



**UNIVERSIDAD ESTATAL DE CUENCA**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**“MAESTRÍA EN GEOMÁTICA”**

**TITULO: “CLASIFICACIÓN Y PREDICCIÓN DE CAMBIO DE COBERTURA DE  
SUELO DE LA CUENCA DEL RIO PAUTE UTILIZANDO HERRAMIENTAS  
GEOINFORMÁTICAS”**

**TESIS PREVIA A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE  
MAGISTER EN GEOMÁTICA**

**AUTOR: Pablo Gonzalo Pesantez Pacheco. Ing.**

**DIRECTOR: Oswaldo Padilla Ing.**

**CUENCA, ECUADOR**

**Marzo- 2015**



## RESUMEN

Este estudio pretende analizar, clasificar y predecir los cambios que ha sufrido la cobertura vegetal de la cuenca del Río Paute (CRP), para la realización de este trabajo se ha planteado el objetivo de clasificar la cobertura vegetal empleando técnicas geoinformáticas tomando como partida la imagen de 1987 la cual fue clasificada y proyectada conjuntamente con la imagen del 2001, para posteriormente ser verificada con información real de la imagen clasificada del 2010. Las imágenes que intervienen en esta investigación fueron adquiridas del sensor Landsat 5 (sensor TM) y Landsat 7 (sensor ETM+), dichas imágenes fueron clasificadas utilizando un método de clasificación híbrido, basada en píxeles y en segmentos.

Se calcularon los cambios, intercambios y transiciones sistemáticas que afectan a las diferentes coberturas de suelo: Bosques/vegetación, Pasto /zonas de cultivo, Centros Poblados, Cuerpos de agua, Páramo, Suelo descubierto/zonas con escasa vegetación; utilizando para ello métodos estocásticos de predicción. Para la predicción se utilizó el software de SIG IDRISI Selva, utilizando los métodos de clasificación de rígidos, análisis multicriterios y autómatas celulares integrados a cadenas de Markov. Las validaciones de las clasificaciones y del modelo de predicción se emplearon matrices de confusión con niveles de concordancia adquiridos por el índice kappa, superiores al 80% de fiabilidad y concordancia. Al final de esta investigación se pudo demostrar incrementos en un 5.07% de degradación del suelo hasta el 2010 y un incremento estimado del 6.32% en un lapso de 15 años, disminución de las principales coberturas de suelo (Bosques/vegetación), por el desplazamiento de la frontera agrícola en un 2.94% por causa de la expansión urbana que ha incrementado en los últimos 23 años un 0.96%.

Palabras claves: Sistema de información geográfica, Cobertura de Suelo, Cadenas de Markov, Idrisi Selva, Autómatas Celulares, Imágenes Satelitales, Cambio de Cobertura.



## ABSTRACT

This study aims to analyze, classify and predict the changes that have taken place in land cover Advertise River Basin (CRP) for the realization of this work has been proposed in order to classify the land cover using geoinformatics techniques taking as starting image 1987 which was graded and designed in conjunction with the image, 2001, later to be verified with real information from the classified image 2010. the images involved in this research were acquired from the Landsat 5 (sensor TM) and Landsat sensor 7 (ETM + sensor), these images were classified using a hybrid method of classification based on pixels and segments.

Changes, exchanges and systematic transitions involving different land cover were calculated: Forest / vegetation, pasture / crop areas, population centers, bodies of water, Paramo Ground bare / sparsely vegetated areas; stochastic methods using for this prediction. GIS software IDRISI Selva was used for prediction, classification methods using rigid, multi-criteria analysis and cellular automata integrated with Markov chains. The validation of the classifications and model prediction of confusion matrices employees with levels of agreement obtained by above 80% reliability and concordance kappa. At the end of this research it was demonstrated increases in 5.07% of soil degradation through 2010 and an estimated increase of 6.32% over a period of 15 years, reduction of principal land cover (forests / vegetation), the displacement of the agricultural frontier into a 2.94% because of the urban sprawl that has increased over the past 23 years 0.96%.



## ABREVIATURAS Y SIMBOLOGIA

AC	<i>(Automata Celular)</i>
AVHRR	<i>(Advanced Very High Resolution Radiometer)</i>
BIL	<i>(Band Interleaved by line)</i>
BIP	<i>(Band Interleaved by Pixel)</i>
BSQ	<i>(Band Sequential)</i>
CRP	<i>(Cuenca del Río Paute)</i>
DE	<i>(DesviacionEstandar)</i>
DTED	<i>(Digital TerrainElevation Data)</i>
ERS	<i>(European Remote Sensing Satellite)</i>
ETM+	<i>(Enhanced Thematic Mapper)</i>
GLCF	<i>(Global Land Cover Facility)</i>
GPS	<i>(Global PositioningSystem)</i>
IGM	<i>(Instituto Geográfico Militar)</i>
IRC	<i>(Infrarojo Cercano)</i>
KML	<i>(Keyhole Markup Language)</i>
NASA	<i>(National Aeronautics and Space Administration)</i>
NDVI	<i>(Normalized Difference Vegetal Index)</i>
NOAA	<i>(National Oceanic and Atmospheric Administration Satellite)</i>
NV	<i>(Nivel Digital)</i>
PROMAS	<i>(Programa para el Manejo del Agua y del Suelo)</i>
SIG	<i>(Sistema de Información Geográfica)</i>
SRTM	<i>(Shuttle Radar Topography Mission)</i>
TM	<i>(Thematic Mapper)</i>
USGS	<i>(United States Geological Survey)</i>



## INDICE

RESUMEN .....	2
ABREVIATURAS Y SIMBOLOGIA .....	4
INDICE.....	5
LISTA DE TABLAS .....	9
LISTA DE FIGURAS .....	11
CLAUSULA DERECHOS DE AUTOR .....	13
CLAUSULA PROPIEDAD INTELECTUAL .....	14
1.1 Descripción del problema y/o necesidad .....	16
1.2 Cuenca del RíoPaute .....	16
1.3 Objetivo General .....	18
1.4 Objetivos Específicos .....	18
CAPITULO II: REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	19
2.1 Sensores Remotos.....	19
2.2 Teledetección.....	20
2.2.1 Sistema de teledetección espacial.....	20
2.2.2 Imágenes Satelitales.....	22
2.3 Sistemas de Información Geográfica (SIG).....	23



2.4	Cobertura de la tierra .....	24
2.4.1	Método Híbrido de Clasificación .....	27
2.5	Evaluación de la exactitud o validación de la clasificación .....	29
2.6	Autómatas celulares .....	30
2.7	Predicción de cambio de cobertura (Cadenas de Markov) .....	32
	CAPÍTULO III: INSUMOS Y MÉTODOS .....	33
3.1	Insumos .....	33
3.1.1	Imágenes de Satélite .....	33
3.1.2	Software .....	34
3.1.3	Sistema de Posicionamiento Global (GPS) .....	35
3.1.4	Información Vectorial. ....	35
3.2	Métodos: .....	35
3.2.1	Identificación del área de estudio .....	35
3.2.2	Obtención de las imágenes satelitales .....	36
3.2.3	Corrección geométrica de Imágenes Satelitales .....	37
3.2.4	Clasificación de Coberturas de Suelo .....	37
3.2.5	Reconocimiento de coberturas de suelo .....	38
3.2.6	Diagrama de Proceso de Clasificación de imágenes satelitales Landsat. ....	42
3.2.7	Validación de la clasificación .....	43
3.2.8	Dinámica del cambio de la cobertura vegetal de la cuenca del Rio Paute. ....	43



3.2.9	Cadenas de Markov. ....	44
3.2.10	Autómatas Celulares .....	46
3.2.11	Diagrama de proceso de predicción de cobertura de suelo .....	47
	CAPÍTULO IV: RESULTADOS.....	48
4	Resultados.....	48
4.1	Clasificación supervisada de imágenes Landsat TM.....	48
4.2	Selección de zonas de entrenamiento. ....	53
4.3	Clasificador de máxima probabilidad.....	55
4.4	Coberturas de suelo .....	57
4.5	Validación de la clasificación. ....	58
4.6	Matriz de confusión de las clasificaciones.....	59
4.7	Ganancia y pérdida de coberturas vegetales.....	61
4.8	Modelo de crecimiento de coberturas y validación. ....	62
4.9	Predicción del cambio de cobertura de suelo para el año 2015 y 2025.....	66
4.10	Análisis de Resultados.....	70
	CAPÍTULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	73
5	Conclusiones y Recomendaciones.....	73
5.1	.....	73
5.2	Recomendaciones.....	74
	CAPÍTULO VI: BIBLIOGRAFIA Y ANEXOS.....	76



6	Bibliografía .....	76
7	Anexos.....	80





## LISTA DE TABLAS

TABLA 1. Rangos del espectro electromagnético imágenes Landsat.....	20
TABLA 2 Metodología para la clasificación no supervisada. ....	26
TABLA 3. Metodologías aplicadas para la clasificación supervisada. ....	27
TABLA 4. Procesos de veracidad de clasificaciones según (Perea, Merocho, & Aguiera, 2009). ....	29
TABLA 5. Imágenes Satelitales sensor Landsat TM ETM+.....	33
TABLA 6. Coberturas de suelo de la CRP y su representación en imágenes satelitales. ....	40
TABLA 7 Parámetros para las distintas probabilidades de cambio. ....	45
TABLA 8. Extracto de matriz de probabilidad de cambio para el año 2010 .....	45
TABLA 9. Códigos de las imágenes clasificadas para los años de 1987 y 2001 ..	49
TABLA 10 Estadística descriptiva de la imagen satelital Landsat TM (1987) aplicando mascara del área de estudio. ....	49
TABLA 11. Coberturas de suelo de la CRP hectáreas y porcentajes (1987) .....	57
TABLA 12. Numero muestras de sitios de entrenamiento para la clasificacion.....	59
TABLA 13. Matriz de confusión para la clasificación de 1987 .....	59
TABLA 14. Matriz de confusión para la clasificación de 2001 .....	60
TABLA 15. Valoración para el Coeficiente kappa.....	60
TABLA 16. Matriz de probabilidad de cambio 1987 al 2010.....	63



TABLA 17. Cruce tabular entre la clasificación real de 2010 y la proyectada CA Markov 2010, nivel de concordancia. ....	64
TABLA 18. Matriz de probabilidad de cambio para el periodo 1987 a 2015 en porcentajes. ....	66
TABLA 19. Porcentajes de cambios de cobertura de suelo periodo 2001 – 2015.	67



## LISTA DE FIGURAS

FIG 1. Área de estudio Cuenca del Rio Paute.....	17
FIG 2. Esquema del funcionamiento de teledetección. ....	21
FIG 3: Vecindarios de AC para una dimensión. Adaptado: Martínez, G.J.....	31
FIG 4: Vecindarios de AC para dos dimensión. Adaptado: Martínez, G.J.....	31
FIG 5. Mascara aplicada al área de estudio Cuenca del Río Paute. ....	36
FIG 6. Diagrama de flujo para la clasificación hibrida empleada para este estudio	42
FIG 7. Clasificación hibrida de imágenes satelitales de 1987 y 2001.....	43
FIG 8. Captura de pantalla del software IDRISI Módulo Land Change Modeler ..	44
FIG 9. Captura de pantalla del Software IDRISI Modulo Markcov.....	45
FIG 10. Diagrama de transición de coberturas empleando cadenas de Markcov. ....	46
FIG 11. Captura de pantalla software IDRISI Selva Modulo CA_Markcov, materialización para el año 2010.....	47
FIG 12. Diagrama de proceso de perdición de coberturas de la Cuenca del Rio Paute. ....	47
FIG 13. Imágenes satelitales empleadas para este estudio izquierda imagen 1987 derecha 2001.....	48
FIG 14. Histograma de las bandas de la imagen Landsat TM (1987) .....	50
FIG 15. Mascara aplicada a las imágenes analizadas (zonas de nubosidad y sombra) .....	51
FIG 16Discriminación de nubes utilizando Índices Vegetales. ....	52



FIG 17. Discriminación de cuerpos de agua y sombra utilizando Índices vegetales.	53
FIG 18. Selección de sitios de entrenamiento por segmentacion, combinacion	43254
FIG 19. Captura de pantalla Software IDRISI, Modulo Segmentation rango 20....	55
FIG 20 Captura de pantalla Clasificaciones finales de la imagen 1987 - Clasificación rígida, módulo Maxlike IDRISI. ....	56
FIG 21. Captura de pantalla, Clasificaciones finales de la imagen 1987 - Suavizado de la clasificación y homogenización con el Módulo Segclass Software IDRISI Selva .....	56
FIG 22. Estadística de la cobertura de suelos en la clasificación de 1987.....	57
FIG 23. Estadística de la cobertura de suelos en la clasificación de 2001.....	58
FIG 24. Avance y pérdidas de la cobertura vegetal de la CRP. Utilizando LCM de IDRISI para los años 1987 – 2001. ....	61
FIG 25. Comparación de Coberturas entre clasificación proyectada y realidad (1987 izquierda, 2010 derechas real) .....	64
FIG 26. Mapa de cobertura de suelo para la Cuenca del Rio Paute año 2001. ....	68
FIG 27. Mapa de cobertura de suelo para la Cuenca del Rio Paute año 2015. ....	68
FIG 28. Mapa de cobertura de suelo para la Cuenca del Rio Paute año 2025. ....	69
FIG 29. Dinámica de cambio de cobertura de suelos de 1987 a 2015. (28 años) .	69



## CLAUSULA DERECHOS DE AUTOR

Pablo Gonzalo Pesantez Pacheco, autor/a de la tesis “CLASIFICACIÓN Y PREDICCIÓN DE CAMBIO DE COBERTURA DE SUELO DE LA CUENCA DEL RIO PAUTE UTILIZANDO HERRAMIENTAS GEOINFORMÁTICAS”, reconozco y acepto el derecho de la Universidad de Cuenca, en base al Art. 5 literal c) de su Reglamento de Propiedad Intelectual, de publicar este trabajo por cualquier medio conocido o por conocer, al ser este requisito para la obtención de mi título de Geomática. El uso que la Universidad de Cuenca hiciere de este trabajo, no implicará afección alguna de mis derechos morales o patrimoniales como autor/a.

Cuenca, 12 de marzo de 2015

Pablo Gonzalo Pesantez Pacheco

C.I: 01049120 35



## CLAUSULA PROPIEDAD INTELECTUAL

Pablo Gonzalo Pesantez Pacheco, autor/a de la tesis “CLASIFICACIÓN Y PREDICCIÓN DE CAMBIO DE COBERTURA DE SUELO DE LA CUENCA DEL RIO PAUTE UTILIZANDO HERRAMIENTAS GEOINFORMÁTICAS”, certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor/a.

Cuenca, 12 de marzo de 2015

Pablo Gonzalo Pesantez Pacheco

C.I: 0104912035



## CAPITULO I: INTRODUCCIÓN.

El análisis multitemporal, es una técnica que permite comparar y determinar el cambio de la cobertura vegetal que acaece a lo largo del tiempo, por lo que se convierte en una herramienta fundamental para la obtención de la información que se emplea para la toma de decisiones en la gestión y conservación de la flora y fauna por parte de los técnicos de las entidades pertinentes. Estos procesos ayudan a determinar escenarios a futuro que servirán para tener en cuenta el aumento de las acciones antrópicas que sufren las cuencas en el lapso del tiempo, ya que si la degradación del suelo y agua aumentan puede ser irreversible y no tener el tiempo necesario para la conservación y gestión de los recursos naturales.

El análisis multitemporal se basa en la utilización de herramientas como son los Sistemas de Información Geográfica (SIG), imágenes de satélite y técnicas como base de los análisis comparativos (Rao, 1998).

La cuenca del RíoPaute (CRP) ha sufrido numerosas alteraciones en lo que respecta a la cobertura vegetal. Estos cambios se han dado en el transcurso del tiempo sin que sean percibidos de una manera alarmante, teniendo como resultado la erosión de la gran mayoría de los suelos de la cuenca.

La cuenca del RíoPaute cuenta con una extensión de 64420.26ha, de las cuales 12296.32ha(19%) se encuentran erosionadas o en proceso de erosión (SIG Cuenca del Río Paute – Cobertura del Suelos, 2001). Esta cifra se refleja en el estado de conservación o deterioro de la cuenca a lo largo de los corredores de los principales ríos.



## 1.1 Descripción del problema y/o necesidad

Según estudios publicados por ALMEIDA, INECCEL-UMACPA 2005, las tasas de erosión que se registran en la cuenca del Río Paute son alrededor del 78.08 TM /Ha/año, datos que ratifican el grave proceso de degradación de los suelos de la cuenca del Río Paute.

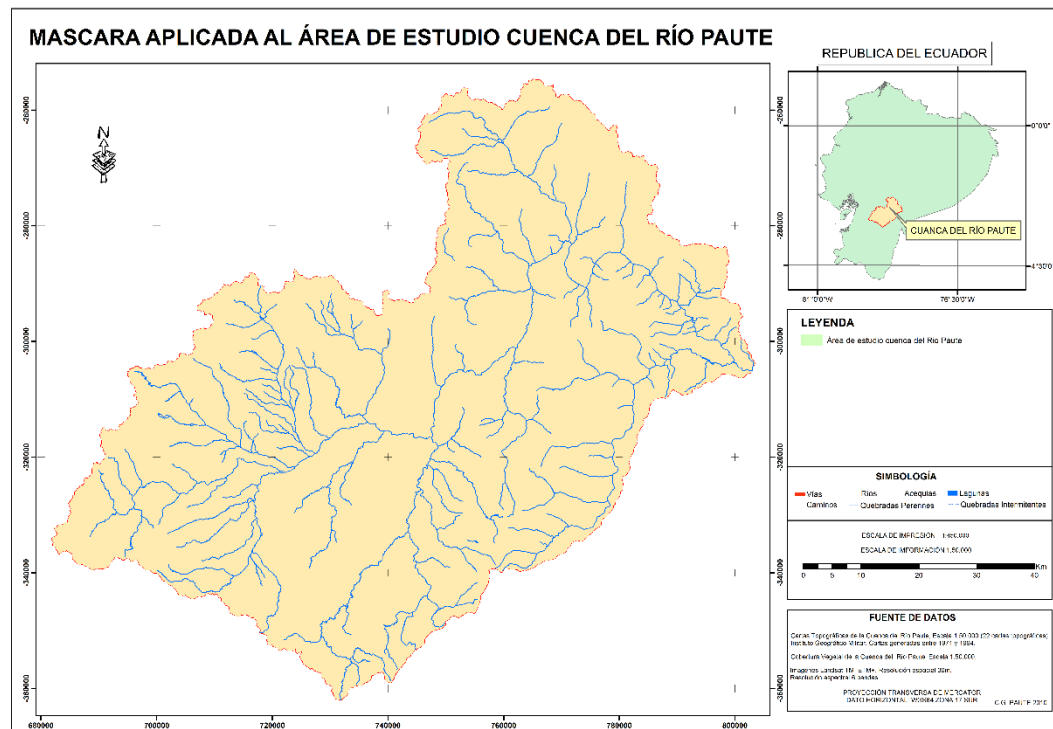
Esto se debe fundamentalmente a factores tales como el incremento de la frontera agrícola, la deforestación de chaparros y bosques, además de varios procesos antrópicos a los que está sujeta la cuenca del Paute. Este proceso seguirá incrementándose con el paso del tiempo, sin ser percibidos por los involucrados de la cuenca, si no se toman medidas al respecto.

Sin embargo, este proceso podría ser mejor entendido si se contase con información sobre los cambios de vegetación que se producen a lo largo del tiempo dentro de la cuenca. Los estudios realizados o publicados sobre análisis multitemporal de la cuenca del Río Paute, son limitados, razón por la que este trabajo pretende identificar los cambios que ha sufrido la cobertura de suelo en el transcurso de los años, información que servirá de base para poder realizar predicciones y adquirir el conocimiento necesario para llevar a cabo acciones que posibiliten la conservación de la cobertura vegetal, lo que a su vez permitirá realizar acciones necesarias para la conservación de los suelos y así evitar la erosión de los mismos.

## 1.2 Cuenca del Río Paute

La Cuenca del Río Paute (Fig. 1) se encuentra localizada al Sur de los Andes Ecuatorianos, en una región de depresión interandina, entre los paralelos 2°15' y 3°15' de latitud sur y entre los meridianos 78°30' y 79°20' de latitud oeste.





*FIG 1. Área de estudio Cuenca del Río Paute.*

Esta cuenca se encuentra delimitada hacia el norte por el nudo de Curiquingue, que divide la hoya del Cañar con la hoya del Paute; hacia el Sur por el nudo del Portete, que divide la hoya del Jubones con la del Paute; hacia el Este por la cordillera Oriental de los Andes, que divide la región del Oriente con la Sierra; y hacia el Oeste por la cordillera Occidental de los andes, que divide la región de la Sierra con la Costa (UMACPA, 1995)

El área de la cuenca tiene una extensión de aproximadamente 5.100,00km<sup>2</sup> (cierre de la Cuenca en el Embalse Amaluza), sus altitudes varían desde 1824ms.n.m. hasta 4680m s.n.m., a pesar de su altitud no presenta nevados o glaciares, esto es debido a su proximidad al eje ecuatorial, cual significa que las estaciones se encuentran divididas en solo dos temporadas: La seca y la húmeda (Cellery, 2007)



Sus recursos hídricos constituyen la fuente de agua potable e irrigación agrícola para la mayor parte de cantones de las dos provincias; y es la fuente de abastecimiento para la generación hidroeléctrica de las Represas Mazar y Daniel Palacios que dependen directamente de los caudales regulados por los páramos y bosques nativos de la región.

En la cuenca se hallan los límites del volcanismo antiguo y los valles Girón - Paute, los mismos que conformarían una barrera geográfica para la migración de especies de la flora andina; estos factores sugieren una riqueza biológica muy importante en la región. (UDA, 2008)

## **Objetivos.**

### **1.3 Objetivo General**

Identificar, clasificar y analizar los cambios en las principales coberturas de suelo de la cuenca del Río Paute utilizando análisis multitemporal y técnicas geoinformáticas.

### **1.4 Objetivos Específicos**

- Obtención de las coberturas de suelo de la cuenca del Río Paute a partir de imágenes satelitales logradas en los últimos años.
- Construir las predicciones de cambio de cobertura vegetal en periodos de 5 años utilizando la Cadena de Markov.



## CAPITULO II: REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Sensores Remotos.

Los sensores remotos colocados a bordo de plataformas satelitales registran energía electromagnética emitida o reflejada por un objeto o superficie en distintas bandas del espectro electromagnético. En tal sentido se habla de dos tipos de clasificación:

Una primera clasificación de los sensores sería entre sensores activos (generan su propia radiación y la reciben rebotada) y sensores pasivos (reciben radiación emitida o reflejada por la Tierra).

Dentro de los sensores pasivos están los sensores fotográficos, óptico-electrónicos que combinan una óptica similar a la fotográfica y un sistema de detección electrónica (detectores de barrido y empuje), espectrómetros de imagen, y de antena (radiómetros de microondas).(Chuvieco, 2010).

Para Paruelo (2008), las técnicas más comúnmente usadas con estos fines han sido la interpretación visual de imágenes y la clasificación digital según Lillesand y Kiefer(2000); Chuvieco(2002). En estos casos, hay, en general, una aproximación de “caja negra” en donde un atributo de la superficie terrestre (por ej. un tipo dado de cobertura) se relaciona con un comportamiento espectral determinado (valores de reflectancia o emisión de la superficie terrestre en distintas longitudes de onda) sin conocer los mecanismos del vínculo.

Las imágenes satelitales proveen entonces datos cuantitativos y espacialmente continuos de la superficie y, en tal sentido, son mucho más que una fotografía. (Paruelo, 2008).

A continuación se presenta los rangos de resolución espacial y espectral de una imagen Landsat TM, ETM+.

**TABLA 1. Rangos del espectro electromagnético imágenes Landsat.**

<b>BANDA</b>	Resolucion Espacial		Resolucion Espectral	
	<b>TM</b>	<b>ETM+</b>	<b>TM</b>	<b>ETM+</b>
1(Azul)	30 m	30 m	0.45-0.52 $\mu\text{m}$	0.45-0.52 $\mu\text{m}$
2(Verde)	30 m	30 m	0.52-0.60 $\mu\text{m}$	0.52-0.61 $\mu\text{m}$
3(Rojo)	30 m	30 m	0.63-0.69 $\mu\text{m}$	0.63-0.69 $\mu\text{m}$
4(Infrarojo Cercano)	30 m	30 m	0.76-0.90 $\mu\text{m}$	0.76-0.90 $\mu\text{m}$
5(Infrarojo Medio)	30 m	30 m	1.55-1.75 $\mu\text{m}$	1.55-1.75 $\mu\text{m}$
6(Infrarojo Termico*)	120 m	60 m	10.4-12.5 $\mu\text{m}$	10.4-12.5 $\mu\text{m}$
7(Infrarojo Medio**)	30 m	30 m	2.08-2.35 $\mu\text{m}$	2.08-2.35 $\mu\text{m}$
8(Pancromatico)	30 m	15 m		0.52-0.90 $\mu\text{m}$

## 2.2 Teledetección.

En su libro Teledetección Ambiental, (Chuvieco, Teledeteccion Ambiental, 2010) considera a la teledetección no solo como la observación y adquisición remota de imágenes de la superficie terrestre mediante sensores aéreos y espaciales, sino también como el tratamiento y procesamiento de esta adquisición; siendo la teledetección un vocablo de la traducción del inglés *remotesensing*.

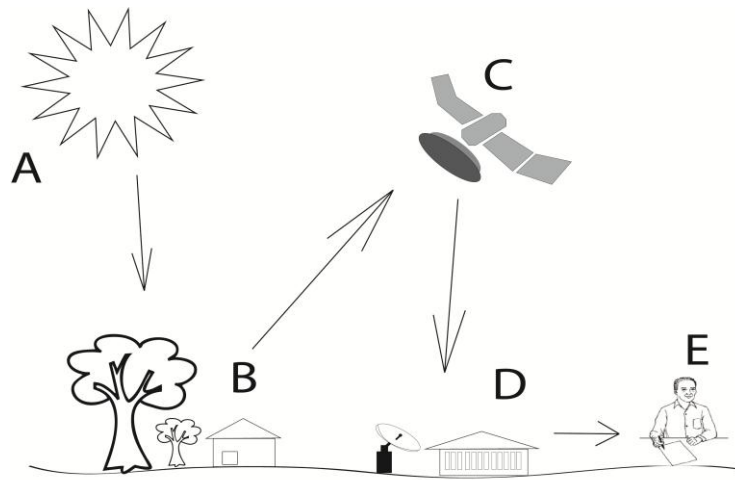
(Novo, 2002), lo define textualmente como: —la tecnología que permite la adquisición de información de objetos, sin tener un contacto físico con ellos.

### 2.2.1 Sistema de teledetección espacial.

De una forma general se puede determinar que existen cinco componentes en el sistema de teledetección espacial los cuales se detallan a continuación:

El primer componente es la fuente de energía. La más habitual es el sol, en cuyo caso se habla de Teledetección pasiva ya que los sensores remotos dependen de esta fuente de energía externa.

El segundo componente es la cubierta terrestre. Cada grupo de objetos de la cubierta (masas de vegetación, mantos de nieve, cuerpos de agua, suelos o superficies urbanas), dependiendo de sus características y naturaleza reaccionan de forma distinta ante el flujo de energía incidente. Una parte de este flujo es absorbido por los objetos, otra es transmitida a los objetos vecinos y, finalmente, otra parte del flujo es reflejada.



Dónde: A=Fuente de Energía, B=Cobertura Terrestre, C=Sensor Remoto, D=Estación Receptora, E=Usuario

*FIG 2. Esquema del funcionamiento de teledetección.*

Esta energía reflejada es captada por el sensor remoto (tercer componente) y codificada digitalmente en un rango cuyos valores dependen de la resolución radiométrica del sensor (256 niveles-ETM-Landsat-, 1.024 niveles -AVHRR-NOAA-, 2.048 niveles -IKONOS, Quickbird- y hasta 65.536 valores en algunos sensores, como MODIS y los radares de ERS y Radarsat).



En ocasiones, la energía emitida por los objetos de la superficie terrestre es la fuente de energía captada por el sensor, especialmente en algunas regiones del espectro electromagnético como el infrarrojo térmico.

Los datos digitales almacenados a en el sensor remoto, son enviados periódicamente, a las estaciones receptoras (cuarto componente), distribuidas convenientemente en la superficie terrestre.

Las imágenes son tratadas visual o digitalmente, mediante programas informáticos de tratamiento digital, por el intérprete (quinto componente) para derivar cartografía temática y otros productos que pueden ser integrados con otra información geográfica.

Finalmente, el usuario (último componente) es el que recibe las imágenes originales y la información derivada de las mismas, con objeto de tomar decisiones en materias diversas como la planificación del territorio, inventario de los recursos naturales, la conservación de la diversidad biológica.(Vega & Isabel, 2010)

### **2.2.2 Imágenes Satelitales.**

Una imagen en forma genérica es una representación en 2 dimensiones de un objeto de 2 o 3 dimensiones. Esta representación puede ser definida por colores o diferentes niveles de gris. Esta puede ser obtenida por muchos medios, ya sea un sensor electrónico o radar mientras que fotografías se refieren a una imagen que fue obtenida sólo mediante medios fotográficos sobre un film. (Harald, 1997)

Los sensores convierten los valores de reflectividad en valores numéricos también llamados valores radiométricos que se extienden entre 0 y 255 (8 bits). Estos valores son almacenados en matrices numéricas compuestas de píxeles (generalmente cuadrados).El valor numérico que codifica cada pixel se denomina nivel digital (ND). El



píxel se define a través de su posición (fila/columna) y su valor, 0 (0% de reflectividad) Negro y 255 (100% reflectividad): Blanco.

Los ND de la imagen son almacenados en códigos binarios (*bit* – 0 ó 1), estas imágenes se organizan en una serie de archivos (*file*), cada uno de los cuales se descomponen en registros (*records*). Normalmente la imagen cuenta con un archivo de cabecera (*header file*) en donde se almacenan sus metadatos.

La distribución de los archivos de una escena está en estrecha relación con el formato en la que se gravan los ND de la imagen, siendo los métodos más habituales de grabación:

- Bandas Secuanciales (*Band Sequential, BSQ*).
- Bandas Intercaladas por líneas (*Band Interleavedby line, BIL*)
- Bandas Intercaladas por píxel (*Band Interleavedby pixel, BIP*)

Junto a estos formatos tradicionales existen otros HDF (*Hierarchical data Format*), GeoTIFF, KML (*KeyholeMarkupLanguage*), que son utilizados por el dominio público, para difundir imágenes georreferenciadas. (Chuvieco, 2010)

### **2.3 Sistemas de Información Geográfica (SIG).**

Los SIG por sus siglas en inglés (*GeographicInformationSystem*) son un Sistema de Información diseñado para trabajar con datos referenciados por coordenadas espaciales o geográficas y sus correspondientes datos no espaciales. Es un sistema computarizado que permite la entrada, almacenamiento, representación y salida eficiente de datos espaciales (mapas) y atributos (descriptivos) de acuerdo con especificaciones y requerimientos concretos. (Navarro, 2011).

Debido a los avances tecnológicos y a la introducción de los Sistemas de Información Geográfica, para el manejo de la información espacial, es necesario definir la escala, como punto de partida para el análisis en una investigación. Es común, referirse a las escalas numéricas enteras en los mapas análogos, fotografías e impresiones, para facilitar la conversión de medidas respecto al terreno real; en tanto que los sistemas indican la escala digital y las conversiones son automáticamente suministradas por él. (Rodríguez, 2011).

El término de escala cartográfica que establece una relación directa entre el tamaño de un objeto caracterizado en un sistema coordinado, respecto su tamaño en el terreno real (Castilla, 2003), la escala empleada depende del objetivo del mapa, de las restricciones presupuestarias , y de la base cartográfica disponible, la manera de representar el tamaño del objeto con la jerarquización de las escalas, denominando pequeñas, a aquellas en las cuales los objetos son representados de manera general o exploratoria y grandes a aquellas en donde los objetos son representados en alto detalle. (Rodríguez, 2011).

## **2.4 Cobertura de la tierra**

- **Determinación de las coberturas vegetales**

Se inicia con la clasificación, por categorías de uso de la tierra, de una parcela dentro de un espacio geográfico delimitado para el propósito de análisis, y la cual se obtiene a partir de la interpretación de información proveniente de los sensores remotos. (Briceño, 2003).

Algunos autores Meyer y Turner, 1994; Moser, (1996), citados por Briassoulis (1999), separan los términos uso y cobertura al definir esta última como la cantidad y tipo de





cubiertas vegetales, cuerpos de aguas, materiales terrestres y las infraestructuras humanas existentes sobre la superficie terrestre.

Las diferencias entre uso y cobertura son remarcadas en algunas publicaciones, por cuanto el tipo de ocupación de la superficie terrestre es interpretada de imágenes captadas por sensores remotos sobre la señal emitida por los objetos, la cual no siempre indica el uso al que se destinan los mismos. (Chuvienco, 2002), por lo tanto, los límites de la cobertura no necesariamente coinciden con los del uso.

El uso del suelo de un área, así como sus cambios espaciotemporales en relación con las actividades humanas, es fundamental para entender y predecir la dinámica de los componentes del paisaje. (Rada & Manuel, 2007).

- Métodos de clasificación de coberturas vegetales.

La clasificación de las imágenes satelitales se basa principalmente en la reagrupación de los píxeles de una imagen de acuerdo a los ND de los mismos, teniendo en cuenta las distintas bandas espectrales que esta posea. (Weng, 2009). Los clasificadores basados por píxel, son los más tradicionales debido a su facilidad de procesamiento, en estos los más demandados son: los no supervisados y los supervisados

#### *Clasificación no supervisada.*

Este método se dirige a definir las clases espectrales presentes en las imágenes. No requiere conocimiento del área de estudio, por lo que el trabajo humano se centra más en la interpretación que en la consecución de los resultados. (Chuvienco, Teledetección Ambiental, 2010).

En la clasificación no supervisada, se da la agrupación de píxeles con valores digitales similares más prevalentes para todas las bandas y cada una de estas agrupaciones son llamadas clases espectrales, las cuales se supone corresponden a un tipo de cubierta de terreno. (Gutiérrez A. , 2005).

La lógica con la que trabaja la clasificación no supervisada se conoce como *análisis cluster o de grupos* y en IDRISI es principalmente el módulo CLUSTER usando una técnica máxima de histogramas multi-dimensional. (Eastman, 2012)

Según Rodríguez, (2011) las metodologías desarrolladas para la clasificación no supervisada utilizada en la última década 2000-2010 son:

**TABLA 2 Metodología para la clasificación no supervisada.**

Metodología clasificación no supervisada	Autor que lo cita	Nombre del artículo
Self-Organizing Map neural network	PANDIT et al, 2011	Classification of Indian power coals using K-means clustering and Self Organizin Map neural network
Clúster media de K	PANDIT et al, 2011	
Self-Organizing Map training	PANDIT et al, 2011	
Basada en Fractales	PANT et al., 2010	
Clúster modificado de Markov	SZILÁGYI et al., 2010	A modified Markov clustering approach to unsupervised classification of protein sequences
Wavelets	OTAZU et al., 2001	Algoritmo de clasificación no supervisada basado en wavelets

### *Clasificación supervisada.*

El primer paso en la clasificación supervisada es identificar ejemplos de las clases de información de interés (es decir, tipos de cubierta terrestre) en la imagen. Éstos se llaman sitios de entrenamiento (training sites). La clasificación supervisada de una imagen se basa en el conocimiento previo del número de clases y algunos parámetros estadísticos asociados a cada clase espectral presente en una imagen (Eastman, 2012), (Espinoza, 2009).

La clasificación supervisada se realiza de distintas maneras siendo las más comunes según Eastman, (2012).

- Clasificadores Rígidos
- Clasificadores Blandos
- Clasificadores Hiperespectrales

Se debe calcular las estadísticas elementales para cada categoría, a partir de los ND de todos los pixeles incluidos los sitios de entrenamiento, ya que las áreas de entrenamiento son fieles representantes de las distintas categorías. (Chuvieco, 2002).

En la última década los investigadores han desarrollado métodos de clasificación supervisadas. Según Rodriguez, (2011) las metodologías desarrolladas para la clasificación supervisada utilizadas en la última década 2000-2010 son:

**TABLA 3. Metodologías aplicadas para la clasificación supervisada.**

Metodología clasificación supervisada	Autor que lo cita	Nombre del artículo
Redes neuronales	VALOUS <i>et al.</i> , 2010	Supervised neural network classification of pre-sliced cooked pork ham images using quaternionic singular
Vecino más cercano	SAMSUDIN & BRADLEY, 2010	Nearest neighbour group-based classification
Clasificador Malhanobis	SOUTH <i>et al.</i> , 2003	Optimal classification methods for mapping agricultural tillage practices
Máxima vecindad	SOUTH <i>et al.</i> , 2003	
Máxima distancia	SOUTH <i>et al.</i> , 2003	
Ángulo del coseno	SOUTH <i>et al.</i> , 2003	
Clasificador espectral y espacial	DE JONG <i>et al.</i> , 2001	An integrated spatial and spectral approach to the classification of Mediterranean land cover types: the SSC method

### 2.4.1 Método Híbrido de Clasificación

En esta clasificación se utilizara un proceso basado en pixeles y otro basado en segmentos (Clasificación Rígida).



El objetivo de esta técnica basada en segmentos es resaltar regiones de características similares, técnica enfoca en los píxeles o grupos de píxeles, esta técnica se basa en el nivel de gris y utiliza parámetros estadísticos de textura, varianza, movimientos entre otros. (Vargas, Neira, & Arango, 2013).

El método de segmentación agrupa los píxeles de una imagen en grupos con base en su similitud homogénea espectral, a través del espacio y todas las bandas analizadas obteniendo una imagen de los segmentos.

Para la generación de las áreas de entrenamiento se debe realizar de forma interactiva. En este método es la parte humana la que determina los posibles sitios de entrenamiento para su ejecución.

En la clasificación de los sitios de entrenamiento se utilizan las imágenes usando una regla algorítmica de mayoría que se aplica a los segmentos de imágenes creados por el la segmentación.

La clasificación basada en objetos (segmentación), no solo se basa en los ND del píxel sino que toma en cuenta la distribución espacial, continuidad de los mismos (píxel) y los reúne en un solo contexto (edificaciones, ríos, calles, coberturas etc) (Rodríguez, 2011)

La Clasificación Rígida toma una decisión definitiva de cualquier píxel que representa a la cubierta vegetal, se utiliza para la clasificación supervisada el método de probabilidad máxima (Eastman, 2012).

## 2.5 Evaluación de la exactitud o validación de la clasificación

La evaluación de la exactitud es un término general para comparar la clasificación con información geográfica que se asume verdadera, con el fin de determinar la veracidad del proceso de clasificación. (Perea, Merocho, & Aguiara, 2009).

Los procesos de veracidad según (Perea, Merocho, & Aguiara, 2009) son: (TABLA 4)

**TABLA 4. Procesos de veracidad de clasificaciones según (Perea, Merocho, & Aguiara, 2009).**

Índice	Concepto	Verificación
Índice de fiabilidad	relaciona los elementos bien clasificados, con respecto al total de puntos chequeados	$F = \frac{n \sum_{i=1}^n X_{ii}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n X_{ij}} 100$
Fiabilidad del usuario	expresa la ocurrencia de que el valor clasificado concuerde con la realidad del terreno incluidos en esa categoría	$F_{u,i} = \frac{X_{ii}}{\sum X_{it}} 100$
Fiabilidad del productor	determina la probabilidad de que los valores del terreno clasificados con ese valor, queden	$F_{p,j} = \frac{X_{jj}}{\sum X_{jt}} 100$
Índice Kappa	analiza las múltiples relaciones entre las categorías clasificadas y determina si la clasificación realizada concuerda con la realidad o es producida al azar.	$K = \frac{N \sum X_{ii} - \sum X_{it} X_{ti}}{N^2 - \sum X_{it} X_{ti}} 100$

Según Rodriguez, (2011) citando a LI *et al.*, (2009), SANTOS, (2007) dice que, la matriz de confusión o contingencia, permite comparar dos clasificaciones: una definida por el usuario como base y la otra, la que se desea evaluar. Se construye una comparación matricial de clases realizadas de la clasificación, ubicada generalmente en diferentes sectores o en la totalidad del mapa, confrontando las clases de cada clasificación.



## 2.6 Autómatas celulares

Según Wolfram S. (1994) citado por Becerra & Castillo, (2009), los autómatas celulares (AC) fueron diseñados por Stanislaw Ulam (1909-1984) y John von Neumann (1903-1957) para proporcionar un marco formal a la investigación del comportamiento de sistemas complejos, donde la salida de información de la celda depende de las varias entradas, modificando su estado y de su celda vecina según su función de transición, teniendo en cuenta que el tiempo y espacio son discretos (Lopez, 2007).

La estructura estudiada fue principalmente en una y rejillas infinitas bidimensionales, aunque las dimensiones superiores también fueron consideradas. Los físicos y biólogos empezaron a utilizar los AC con el propósito de modelar sus estudios. (Palash & Sarkar, 1999).

Según la definición de Palash & Sarkar (1999), los autómatas celulares se representan por la siguiente visión matemática:

$$A = (S_d, Q, N, \delta)$$

Donde:

*A = Representa un autómata celular*

*S<sub>d</sub> = Representa el espacio de las celdas, y d la dimensión*

*Q = Corresponde al conjunto de estados*

*N = Representa el vecindario celular*

*δ = Corresponde a la regla de estado de transición basada en el vecindario*

Los AC pueden ser n-dimensionales, pero para la simulación en la realidad se fundamenta básicamente en 1, 2 ó 3 dimensiones, que presentan un tamaño finito. Para que una

célula pueda ser modificada en su estado (viva-muerta), debe saber el estado de su célula vecina. (Trujillo, 2009)

Según Martínez, G.J. citado por Becerra & Castillo, (2009) los vecindarios para una dimensión de los AC serían.

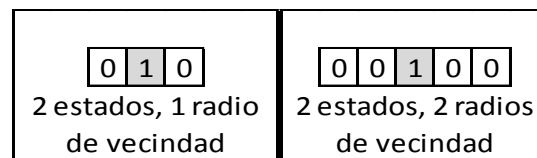
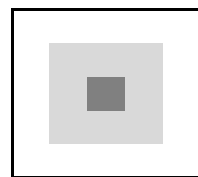
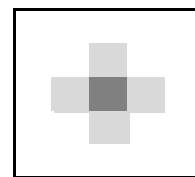


FIG 3: Vecindarios de AC para una dimensión. Adaptado: Martínez, G.J

Las vecindades más conocidas en los AC de dos dimensiones son: la de Von Neumann que consiste en una célula central, que es la célula que será actualizada, y cuatro vecinos geográficos norte, sur, este y oeste; y la vecindad de Moore que consiste en el conjunto de ocho células que rodean a la célula central.(Trujillo, 2009).



vecindad de Moore



vecindad de Von Neumann

FIG 4: Vecindarios de AC para dos dimensión. Adaptado: Martínez, G.J

Los AC estocásticos con el propósito de simular situaciones físicas y biológicas, deben ser aleatorias o ser definidas por reglas de transición probabilísticas, convenientemente considerar en su dinámica aspectos probabilísticos que simulen la realidad. (Hernandez & Torres, 1994).



Es por esta razón que los autómatas celulares se utilizan ampliamente en la predicción de cambios de coberturas en transiciones estocásticas, además los autómatas celulares han sido utilizados en el procesamiento de imágenes y reconocimiento de patrones.

El estado de los AC es un tiempo  $t+1$  ( ) está en función de su propio estado ( ) en el tiempo  $t$  y de los estados de todos los elementos ubicados en su vecindad, teniendo mayor influencia de cambio los vecinos más cercanos que los que se encuentran en diagonal. (Padilla, 2005)

## 2.7 Predicción de cambio de cobertura (Cadenas de Markov)

Para la determinación de las probabilidades de cambio de la cobertura de suelo se utilizarán las Cadenas de Markov. Se obtiene una matriz de transición de Markov generalmente a través de la comparación de mapas de cobertura de suelos de dos fechas  $t_0$  y  $t_1$ . Este método consiste en analizar sistemas que contienen ciertos parámetros de probabilidad, teniendo como mejor predictor el uso pasado y actual de dicha cobertura (Elena G. Irwin a, 2001).

Como es conocido, las cadenas de Markov son procesos de corta memoria en el sentido que solo “recuerdan” el último estado visitado para decidir cuál será el próximo.

En términos formales, el proceso  $\{X_n\}_{n \in \mathbb{N}}$  con espacios de estados  $E$ , es una cadena de Markov si;

$$P(X_{n+1} = y | X_n = x_n, \dots, X_0 = x_0) = P(X_{n+1} = y | X_n = x_n)$$





donde  $x_n \in E$ . En procesos con “larga memoria” el valor que toma el proceso en cada paso depende de todo el pasado. (Vega M. V., 2004)

## CAPÍTULO III: INSUMOS Y MÉTODOS

### 3.1 Insumos.

#### 3.1.1 Imágenes de Satélite

Las fuentes de datos para la clasificación digital de imágenes son diversas pero entre ellas se destacan las imágenes satelitales de la serie Landsat (National Aeronautics and Space Administration NASA, 1998), cuyos objetivos han sido cartografiar y evaluar los recursos naturales. (Gutiérrez M. et al., 2005). Las imágenes adquiridas poseen un tratamiento realizado por el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS), con una corrección estándar de terreno, nivel 1T, quiere decir, con precisión radiométrica y geométrica sistemática, empleando los modelos digitales de elevación SRTM, NED, CDAD, DTED, y GTOPO 30, para precisión y corrección topográfica. (Rodríguez, 2011).

Para el desarrollo de este estudio se procedió a realizar una búsqueda exhaustiva de todas las imágenes satelitales de la cuenca del Río Paute dentro del portal de Global LandCoverFacility (GLCF) de la University of Maryland y de la Global Visualization Viewer (USGS) de los Servicios Geológicos de los Estados Unidos de América, tomando en cuenta el porcentaje mínimo de nubosidad. Estas imágenes se encuentran a disponibilidad y van desde los años de 1985 hasta 2012.

*TABLA 5. Imágenes Satelitales sensor Landsat TM ETM+*



BANDAS	CODIGO	% NUBOSIDAD	FECHA	PRODUCTO
6	ID: LT50100621987085XXX10	CC: 10%	26/03/1987	Qty: 9 Product: TM L1T
NO	ID: LT50100621998195XXX01	CC: 30%	14/07/1998	Qty: 9 Product: TM L1T
6	ID: LE70100622001307EDC00	CC: 29%	16/05/2000	Qty: 9 Product: ETM+ L1T
6	ID: LE70100622001307EDC00	CC: 29%	3/11/32001	Qty: 9 Product: ETM+ L1T
6	ID: LE70100622004364ASN00	CC: 16%	29/12/2004	Qty: 9 Product: ETM+ L1T
6	ID: LE70100622007052ASN00	CC: 32%	21/02/2007	Qty: 9 Product: ETM+ L1T
6	ID: LE70100622010236ASN00	CC: 37%	24/08/2010	Qty: 9 Product: ETM+ L1T

### 3.1.2 Software

El software utilizado fue IDRISI, por ser un programa de fácil manejo que contiene más de 300 módulos para el análisis SIG y espacial, contiene además herramientas estadísticas y de superficie que ayudan a la toma de decisiones en el estudio de series de tiempo. (Eastman, 2012). Plataforma desarrollada con fines de investigación por la Universidad de Clark, se utilizó licencia de prueba de 30 días.

En el planteamiento de estudio se propuso realizar una clasificación supervisada y no supervisada la misma que se partirá con el apoyo de la plataforma IDRISI el cual cuenta con un sistema de clasificación más extensa dura y blanda, la misma que se basa en el clasificador de aprendizaje de máquinas como redes neuronales y análisis de árbol de clasificación. (Eastman, 2012)

También se utilizó como plataforma de apoyo ArcGis con licencia académica de la ESPE (Universidad de las Fuerzas Armadas), para las distintas presentaciones de los resultados y conversiones de archivo; ya que es un completo sistema informático que posee herramientas avanzadas de análisis espacial, y tratamiento de datos.



### **3.1.3 Sistema de Posicionamiento Global (GPS).**

Para la obtención de puntos de control y validaciones de campo al término de la clasificación se utilizó el GPS navegador JUNO ST el mismo que posee un rango de error de 2 a 5 m en tiempo real (Trimble, 2012).

### **3.1.4 Información Vectorial.**

La información referente a formatos vectoriales, tales como cobertura vegetal 1991 2001, red vial, red hídrica, entre otros fue adquirida del Sistema de Información Geográfica del consejo de la cuenca del Río Paute.

## **3.2 Métodos:**

### **3.2.1 Identificación del área de estudio.**

El área de estudio empleada fue la cuenca del Río Paute con un área aproximada de 644.201,29ha; en la imagen de 1987 se identificó el 9.31% de zonas con nubosidad y sombra de la cual se obtuvo una máscara, la misma que fue aplicada a la imagen de 2001 con el propósito de garantizar la fiabilidad de los resultados, y no alterar los mismos.

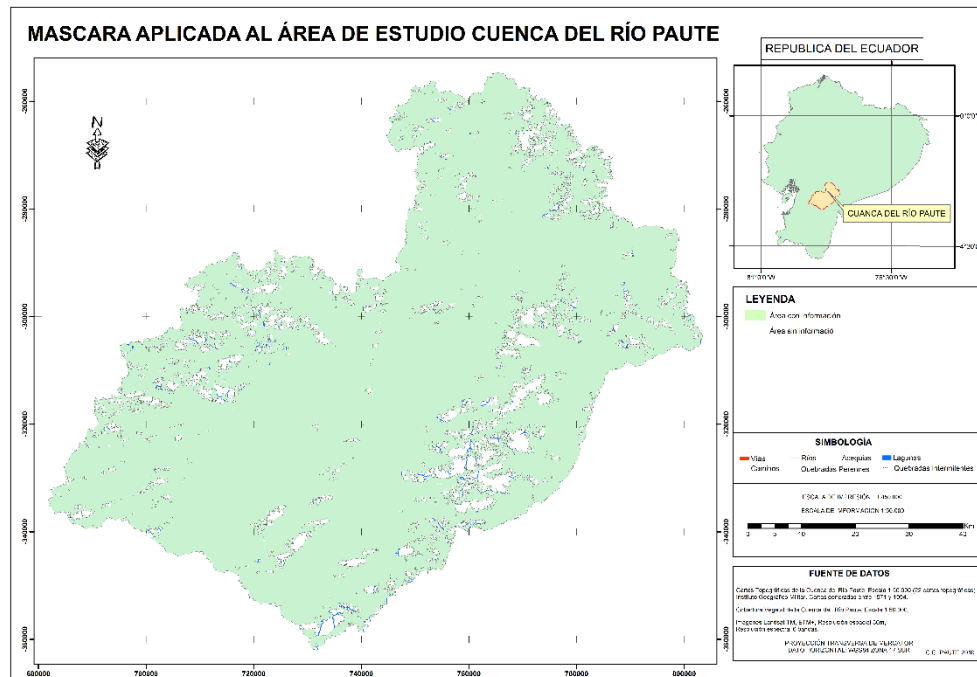


FIG 5. Mascara aplicada al área de estudio Cuenca del Río Paute.

### 3.2.2 Obtención de las imágenes satelitales.

Las imágenes obtenidas desde el servidor de la USGS fueron capturadas por los satélites y Landsat 5 (sensor TM) y Landsat 7 (sensor ETM+) este último mejorado la resolución espacial de 30m a 15m en una banda pancromática y aumentando la resolución de la banda térmica a 60m. (Chuvieco, Teledetección Ambiental, 2010)

En total se obtuvieron 39 imágenes satelitales de distintas épocas las mismas que fueron almacenadas en una base de datos para su respectivo análisis. De estas imágenes se procedió a categorizar según la disponibilidad de las bandas, ya que en algunas imágenes no poseían, quedándonos con un total de 7 imágenes satelitales para su tratamiento.

Las imágenes empleadas para este caso de estudio fueron las de 1987 y 2001, estas están con un porcentaje de nubosidad relativamente bajo 10%.



También se optó por adquirir la imagen satelital de la CRP del sensor RapidEye de una resolución espacial de 5m y espectral de 5 bandas, la cual sirvió para la validación del modelo de predicción.

### **3.2.3 Corrección geométrica de Imágenes Satelitales**

Para rectificar geométricamente las imágenes satelitales obtenidas se tomó en cuenta la cartografía existente de la cuenca del Río Paute (SIG CRP - UDA) generada a partir de las cartas topográficas del IGM escala 1:50.000, para lo cual se procedió a realizar una base de datos con las coberturas necesarias para este estudio dentro de la plataforma del software IDRISI.

Las coberturas importadas al programa IDRISI fueron: Contorno cuenca del Río Paute, Ríos torrentes de la cuenca del Río Paute, Caminos principales, Centros Poblados, Cobertura vegetal del Suelo 1991 y 2001, esta información sirvió para los respectivos análisis de este trabajo.

### **3.2.4 Clasificación de Coberturas de Suelo**

En la cuenca del Río Paute la vegetación más predominante es vegetación leñosa, bosques y vegetación nativa. Vegetaciones nativas integradas por masas boscosas; chaparro; bosques intervenidos las cuales se encuentran en las subcuentas del oriente. (CG Paute, 2010).

Para este estudio se tomó como referencia la clasificación de cobertura de suelo, empleada por el PROMAS (Programa para el Manejo del Agua y del Suelo –



Universidad de Cuenca) en el estudio de la generación del atlas de la cuenca del Río Paute. La misma que tiene las siguientes coberturas:

- Bosque y vegetación leñosa nativa.
- Paramo
- Pastos y cultivos
- Suelo descubiertos
- Centros poblados y/o vías
- Vegetación Introducida
- Cuerpos de Agua
- Nubes
- Sombras

Esta clasificación sirvió de guía para la obtención de las distintas clases de coberturas y se empleó para predecirlas, ya que son las más representativas de dicha cuenca, comparadas con las clasificaciones realizadas por el CLIRSEN (Universidad del Azuay).

Las clasificaciones de las imágenes fueron realizadas utilizando el programa IDRISI Selva, empleando una clasificación basada en segmentos y otra en pixeles (clasificación híbrida).

### **3.2.5 Reconocimiento de coberturas de suelo**


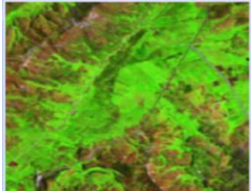
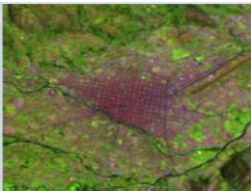
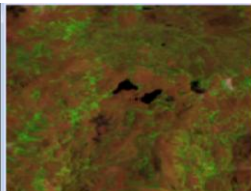

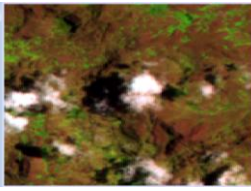
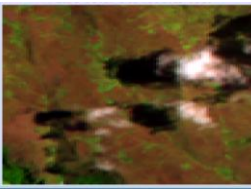
Para el reconocimiento de las coberturas de la cuenca del Río Paute se procedió a realizar la composición en falso color tomando para esto las bandas del espectro electromagnético del azul, verde, rojo e infrarrojo cercano que comprenden las longitudes de onda como se detallan en la tabla 1.

Tomando en cuenta las características físicas de las distintas superficies se logró identificar y caracterizar las coberturas vegetales:



UNIVERSIDAD DE CUENCA

**TABLA 6. Coberturas de suelo de la CRP y su representación en imágenes**

COBERTURA	CRITERIOS DE IDENTIFICACION	VISUALIZACION EN LA IMAGEN
<b>Bosques/vegetación densa</b>	En combinación de bandas 123, color verdadero en tonalidades verdosas oscuras, combinación falso color 342, color verde oscuro forma irregular y textura rugosa.	
<b>Pasto /zonas de cultivo</b>	En combinación de bandas 342, coloración verde agua, en combinación 123 color verde claro, con textura llana y formas irregulares.	
<b>Centros Poblados</b>	De distintas tonalidades, se agrupan píxeles de gran heterogeneidad cromática combinación 123, de contornos rectos y polígonos regulares visto en combinación 342 colores con tendencia a lila	
<b>Cuerpos de agua</b>	De tonalidad azul oscuro hasta negro en combinación 123, de forma larga para ríos y alargada para lagunas y reservorios con textura lisa.	
<b>Páramo</b>	De tonalidad marrón claro intercalados con coloraciones claras en combinación 342 con formas irregulares y textura lisa	
<b>Nubes</b>	Color intenso de ND que van desde 138 hasta 255, de tonalidades blancas vistas en combinación 342, de formas irregulares, ovaladas.	
<b>Sombra</b>	De color oscuro, en algunos casos gris por la mezcla con coberturas vegetales, vista en combinación 342	

satelitales.





Esta tipología sirvió para obtenerla clasificación de las imágenes satelitales de 1987 y 2001. Esta clasificación se realizó con la implementación de las plataformas antes mencionados, dicha clasificación fue empleada para los análisis de predicción.

### 3.2.6 Diagrama de Proceso de Clasificación de imágenes satelitales Landsat.

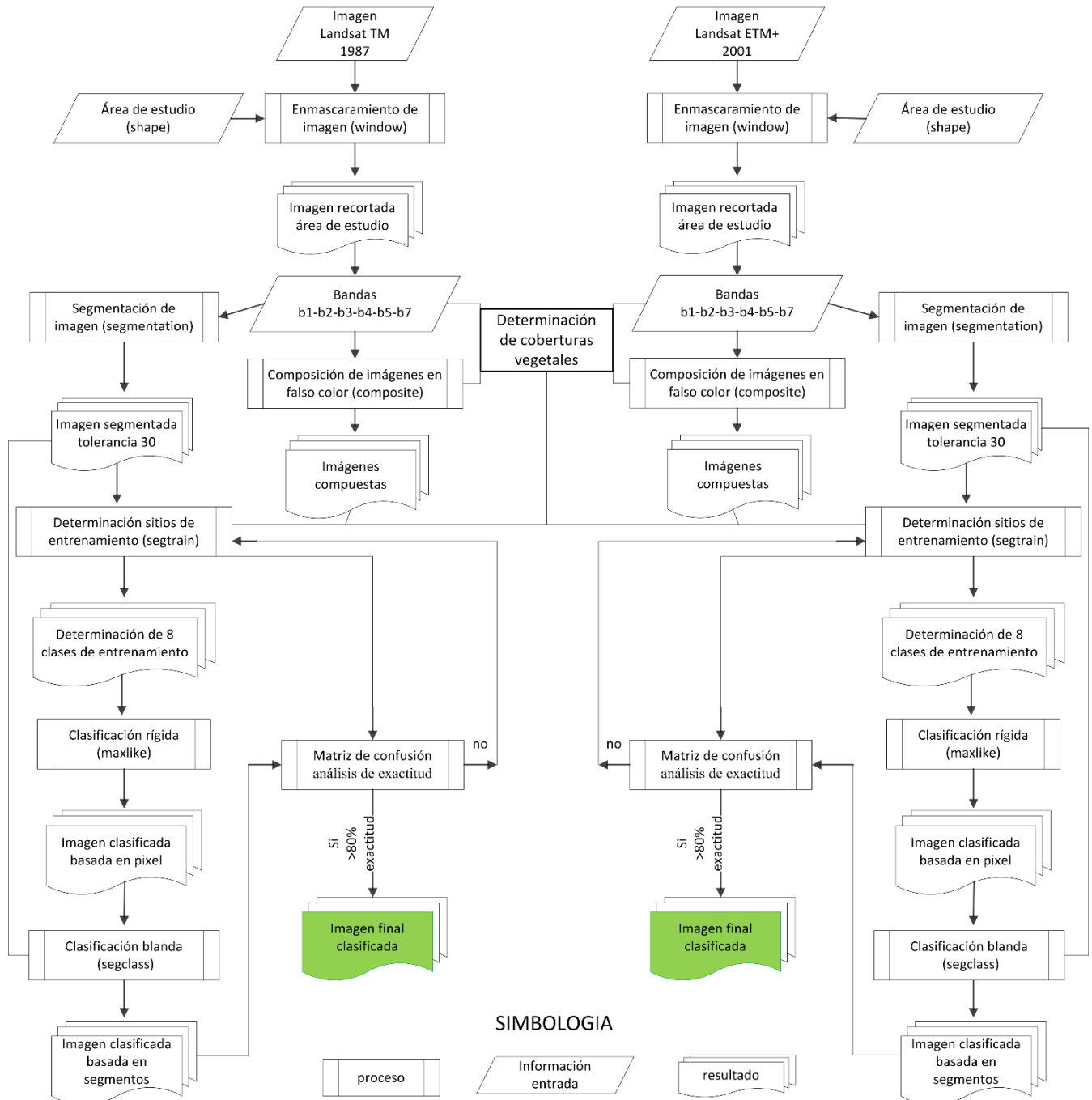


FIG 6. Diagrama de flujo para la clasificación híbrida empleada para este estudio

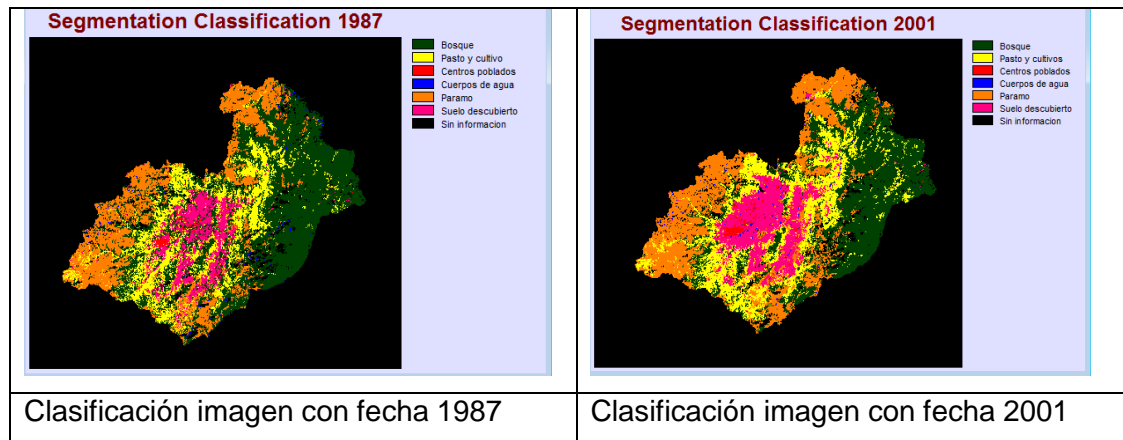


FIG 7. Clasificación híbrida de imágenes satelitales de 1987 y 2001

### 3.2.7 Validación de la clasificación

Para la validación del método de clasificación realizada en esta investigación, se hizo con un análisis de exactitud, comparando las clasificaciones de los años 1987 y 2001 utilizando los parámetros de clasificación (Congalton RG, 1999), con los sitios de entrenamiento de las distintas coberturas vegetales para los años antes mencionados.

### 3.2.8 Dinámica del cambio de la cobertura vegetal de la cuenca del Rio Paute.

Realizado las clasificaciones de las imágenes de 1987 y 2001, se procedió al análisis estadístico descriptivo, para lo cual se hizo uso de la herramienta LCM del software IDRISI; este módulo permite realizar un análisis de las ganancias y pérdidas de superficie experimentadas por las coberturas, así también como sus tendencias, la proyección de su curso en el futuro, y la evaluación e implicaciones del cambio de hábitat y de la biodiversidad. (Eastman, 2012).

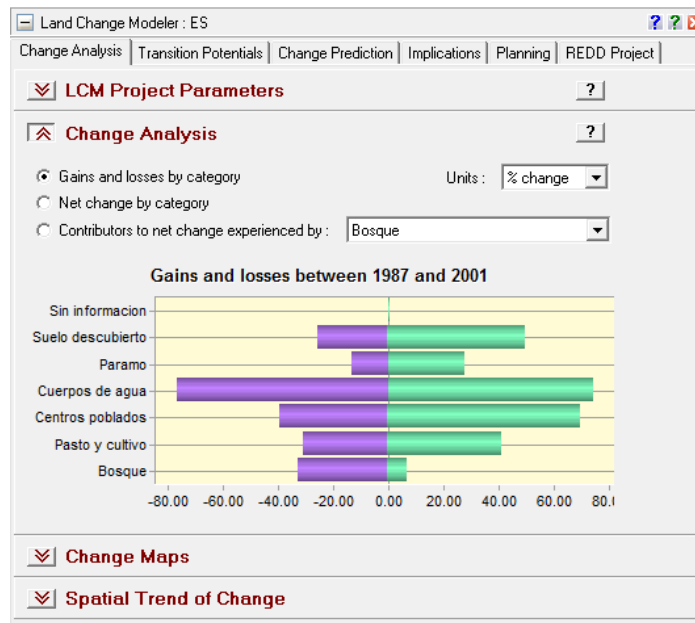


FIG 8. Captura de pantalla del software IDRISI Módulo LandChangeModeler

### 3.2.9 Cadenas de Markov.

Para la predicción de los cambios de coberturas, se utilizaron los modelos de procesos de Markov que describen diversas situaciones, probabilidades de que ocurran o no ciertos eventos, cuya condición actual dependen de su anterior escenario para poder predecir el próximo.

Las cadenas de Markov “son procesos de corta memoria en el sentido de que solo recuerdan el último estado visitado”. (Vega M. V., 2004).

Para la realización de este análisis se procedió a utilizar el módulo Markov del Software IDRISI, el cual analiza dos imágenes cualitativas de cubierta terrestre de distintas fechas y produce una matriz de transición, una matriz de áreas de transición y un juego de imágenes de probabilidad condicional (Eastman, 2012).

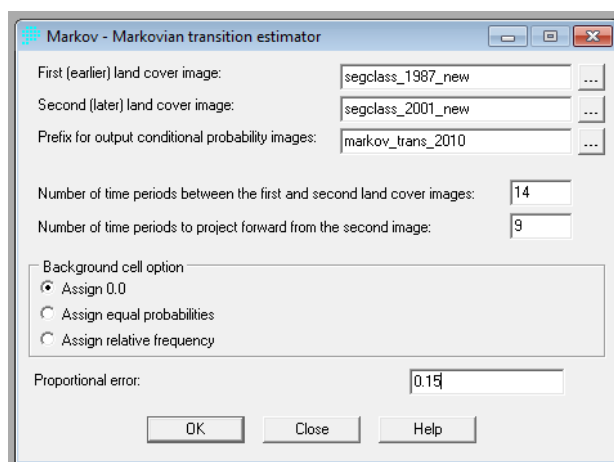


FIG 9. Captura de pantalla del Software IDRISI Modulo Markcov.

Este módulo analiza y desarrolla matrices, las mismas que expresan la probabilidad en porcentaje de que un pixel de una categoría de uso de suelo determinada (a), se mantenga o cambie a la categoría (b), en un periodo de tiempo .

TABLA 7Parámetros para las distintas probabilidades de cambio.

año inicial (a)	año base (b)	año prediccion	# de periodos entre (a -b)	# de periodos a proyectar	error proporcional
1987	2001	2010*	14	9	0.15
1987	2001	2015	14	14	0.15
1987	2001	2025	14	24	0.15

\*Año de validación del modelo

TABLA 8. Extracto de matriz de probabilidad de cambio para el año 2010

coberturas vegetales	cobertura vegetales		
		Bosque	Pasto y cultivo
		Centros poblados	
	Bosque	0.67	0.23
	Pasto y cultivo	0.06	0.64
	Centros poblados	0.00	0.01
		0.43	

Diagrama de transición, **A**=Bosque, **B**=Pasto-cultivo y **C**=Centros poblados

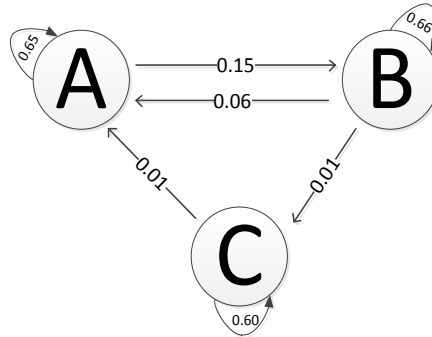
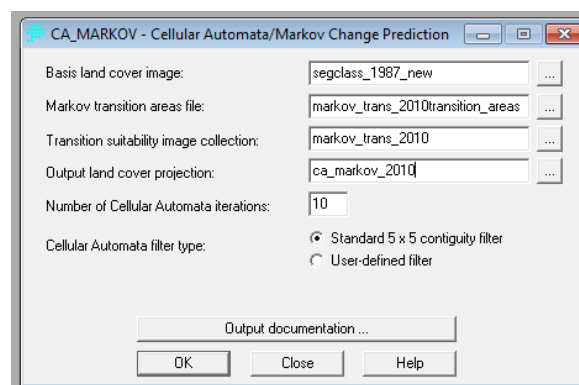


FIG 10. Diagrama de transición de coberturas empleando cadenas de Markov.

### 3.2.10 Autómatas Celulares

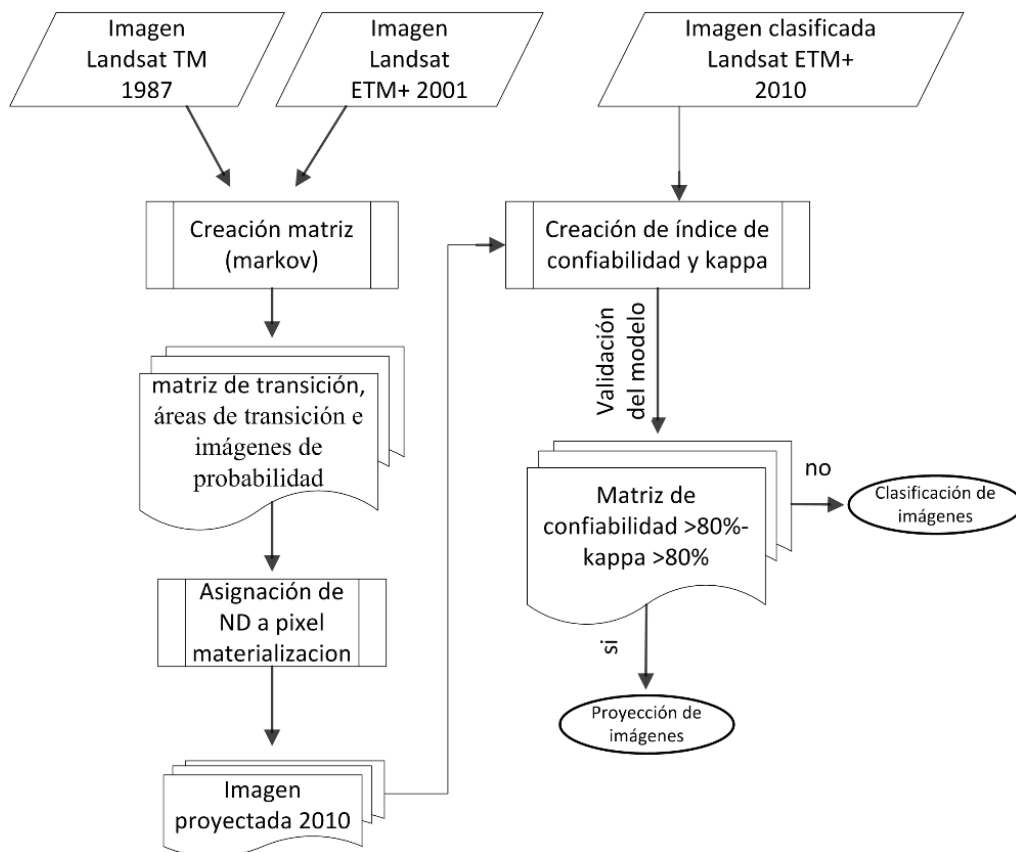
Siendo un sistema dinámico discreto que se desarrolla en el espacio - tiempo, compuesto por celdas, cuadrícula, vecinos y reglas. Las celdas son el elemento básico de los autómatas celulares, las cuales pueden tener estados binarios 1 o 0; la cuadrícula es la disposición de esas celdas en una red espacial en una o dos dimensiones; los vecinos son las celdas que determinan el estado de la celda para el próximo período. En el caso de las simulaciones realizadas se utilizó el vecino (o filtro) Von Neumann extendido, que viene por defecto en el módulo CA\_Markov de IDRISI.



**FIG 11.** Captura de pantalla software IDRISI Selva Modulo CA\_Markcov, materialización para el año 2010.

Para la materialización de predicción hace falta crear una serie de mapas de ocupación del suelo por cada cobertura obtenida para un tiempo dado, es donde a través del módulo CA Markov se asigna un nivel digital a cada píxel el mismo que expresa la probabilidad de pertenecer a la categoría analizada y estimada en la matriz de transición.

### 3.2.11 Diagrama de proceso de predicción de cobertura de suelo



**FIG 12.** Diagrama de proceso de perdición de coberturas de la Cuenca del Rio Paute.

## CAPÍTULO IV: RESULTADOS

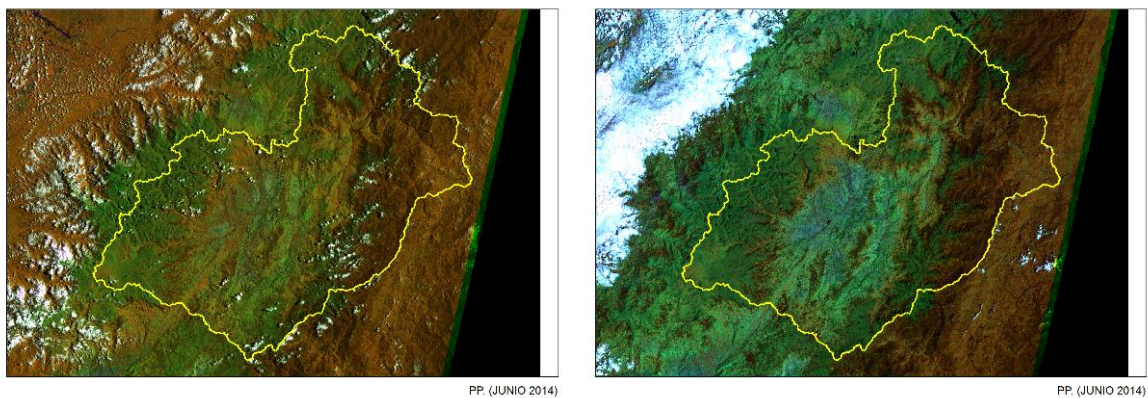
### 4 Resultados.

#### 4.1 Clasificación supervisada de imágenes Landsat TM.

Una vez realizada la búsqueda de las Imágenes satelitales ubicadas en el Path/Row 10/62 en el portal de la USGS, se las procedió a categorizar de acuerdo al porcentaje de nubosidad de cada una de las mismas, teniendo como referencia las coordenadas externas del área de estudio ( $79^{\circ}26'57''$  y  $2^{\circ}18'32''$  esquina SI,  $78^{\circ}13'12''$  y  $3^{\circ}16'56''$  esquina ID).

Se analizaron un total de 39 imágenes satelitales, descartando 32 imágenes ya que no cumplían con los porcentajes de nubosidad de menor al 37%. Ver tabla 5

De las 7 imágenes analizadas se procedió a categorizar de acuerdo al número de firmas espectrales (6 bandas espectrales), que para este estudio fue indispensable, teniendo como resultado las imágenes de los años de 1987 y 2001.



*FIG 13. Imágenes satelitales empleadas para este estudio izquierda imagen 1987 derecha 2001*



A continuación se presenta los parámetros de las imágenes satelitales utilizadas para este estudio:

**TABLA 9. Códigos de las imágenes clasificadas para los años de 1987 y 2001**

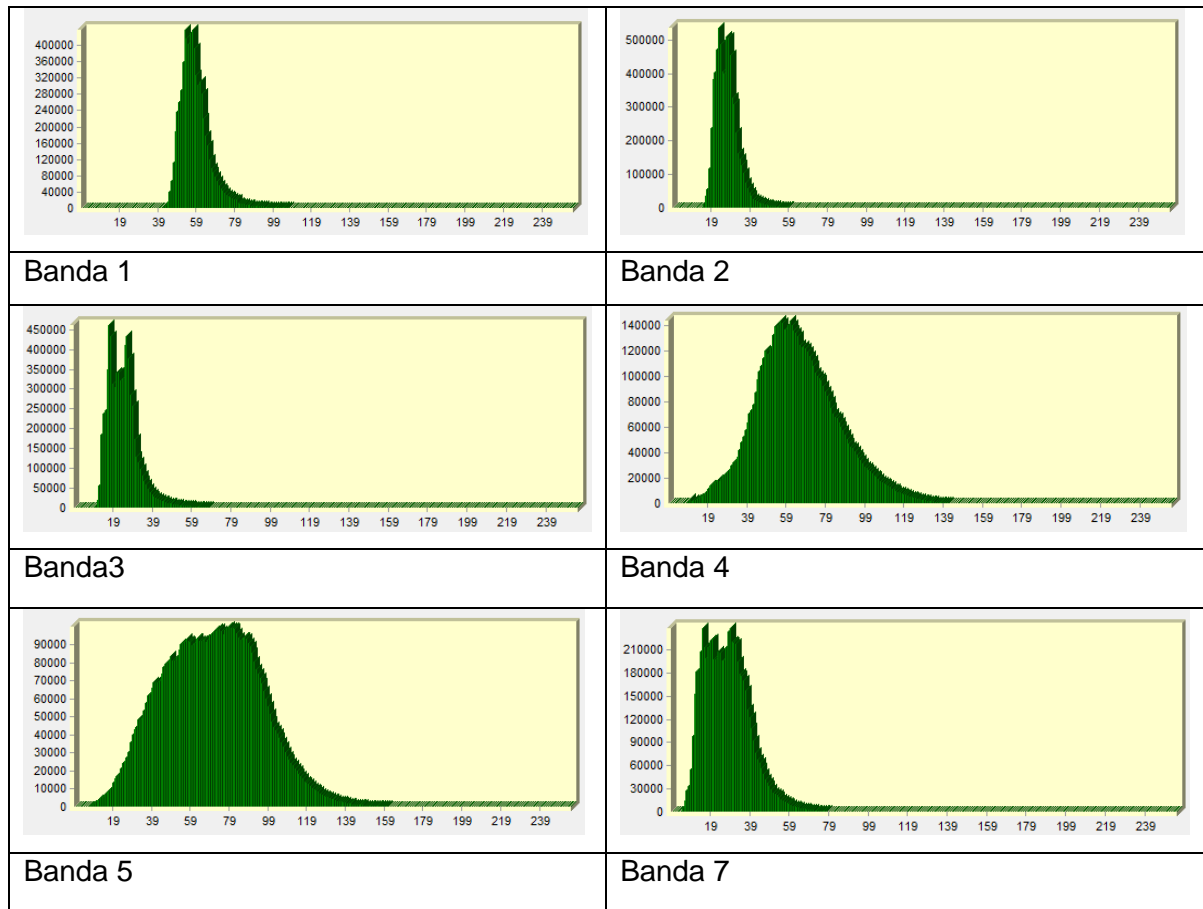
BANDAS	CODIGO	% NUBOSIDAD	FECHA	PRODUCTO
6	ID: LT50100621987085XXX10	CC: 10%	26/03/1987	Qty: 9 Product: TM L1T
6	ID: LE70100622001307EDC00	CC: 29%	3/11/32001	Qty: 9 Product: ETM+ L1T

Realizado la categorización de dichas imágenes se realizó los distintos análisis espectrales y estadísticos de las mismas, para tener un panorama más amplio de las imágenes a clasificar.

**TABLA 10. Estadística descriptiva de la imagen satelital Landsat TM (1987) aplicando mascara del área de estudio.**

	Minima	Maxima	Madia	Desv. Estandar
Banda 1	38	256	58.252	8.53
Banda 2	12	161	26.775	6.081
Banda 3	8	200	23.724	7.987
Banda 4	5	213	64.212	20.55
Banda 5	6	256	69.197	24.67
Banda 7	2	256	26.988	11.443

Al realizar el análisis estadístico descriptivo, se puede observar los niveles de saturación en las bandas 1,5 y 7 por los valores de 256 en los Niveles Digitales (ND), se observa que en las bandas 4 y 5 existe una heterogeneidad de los valores por ser los más altos en la Desviación Estándar (DE), de esta descripción se puede concluir que los valores de 20.55 en la DE en la banda 4 estarían en concordancia con los valores estándares de esta banda, la misma que fue diseñada para determinar las distintas coberturas de vegetación, caso contrario con la banda 7 que al tener un valor mínimo relativo represente áreas lagunares, ríos y embalses que existen en la zona de estudio, la distribución de los ND se pueden observar en la figura 14.



*FIG 14. Histograma de las bandas de la imagen Landsat TM (1987)*

También se realizó el análisis estadístico descriptivo de las demás imágenes que se emplearon en este estudio (ver anexo 1).

Sin embargo las imágenes Landsat TM +ETM poseen un archivo metadata en el cual se encuentra toda la información técnica de la imagen satelital.

Para la realización de la predicción del cambio de cobertura en la cuenca del Río Paute se hizo una clasificación de las imágenes satelitales de los años 1987-2001

respectivamente. Esta clasificación se realizó con la ayuda de la plataforma IDRISI, Esta plataforma cuenta también con LCM(LandChangeModeler) para el análisis del cambio de cobertura del terreno y la proyección de su curso en el futuro teniendo en cuenta la evaluación del hábitat y la biodiversidad. (Eastman, 2012).

Con la finalidad de obtener una buena clasificación supervisada del área de estudio se procedió a realizar una máscara del área a intervenir con el fin de homogeneizar la información al momento de analizarla. Esta mascara fue elaborada analizando las zonas con nubosidad y sus sombras de las imágenes implementadas para este estudio.

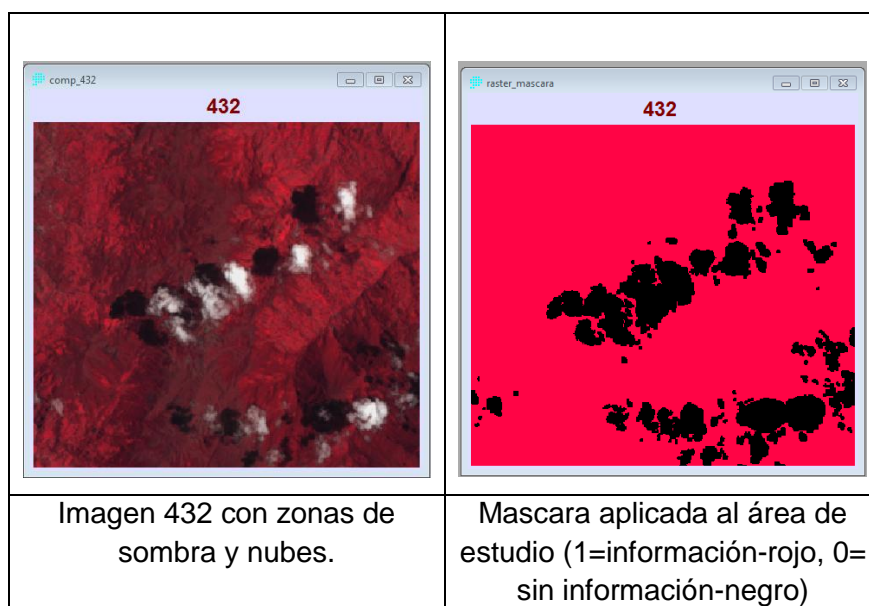


FIG 15. Mascara aplicada a las imágenes analizadas (zonas de nubosidad y sombra)

Con la ayuda del NDVI (NormalizedDifferenceVegetationIndex) el cual nos ayuda a discriminar la vegetación, teniendo en cuenta las bandas 3 y 4, ya que mide las longitudes de onda  $[0.63-0.69 \mu\text{m}]$  en el rojo,  $[0,76-0,90 \mu\text{m}]$  en el infrarrojo cercano respectivamente, mediante la fórmula 4.1.1(Cuesta *et al*, 2005), se determinó las zonas con nubosidad que posteriormente sirvió como base para determinar la mascara que se aplicó a las imágenes.

#### 4.1.1 NDVI

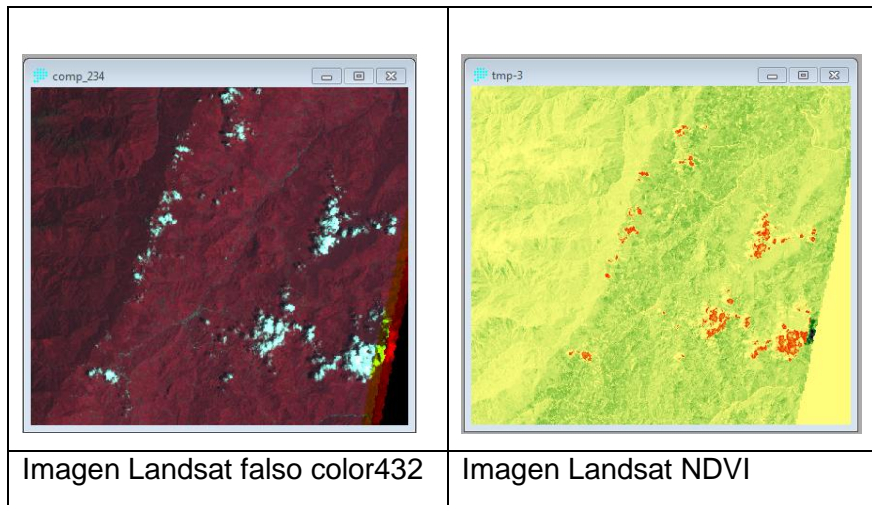
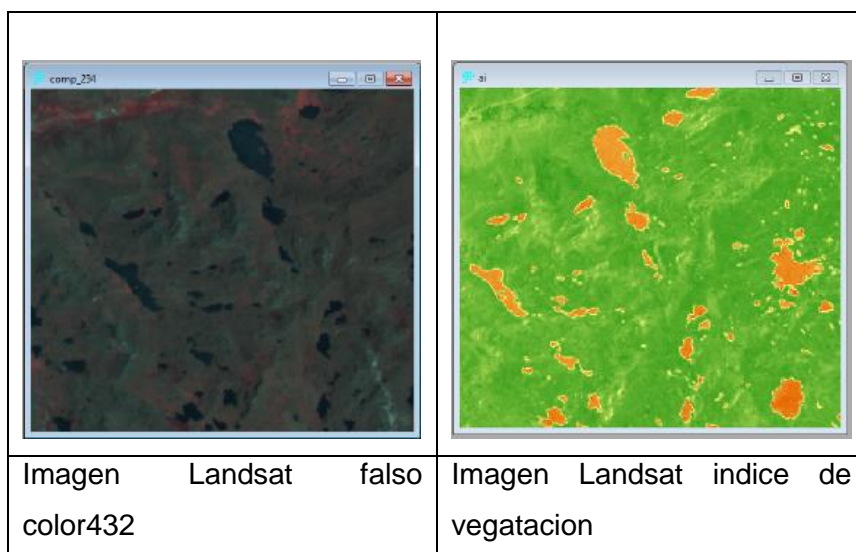


FIG 16. Discriminación de nubes utilizando Índices Vegetales.

También se aplicó un índice de vegetación en cual sirvió para la discriminación de los cuerpos de agua, este índice utiliza las bandas VERDE (PG) y la del infrarojo medio (PSWIR), dada por la ecuacion 4.1.2(Bart, et al. 2010)

$$4.1.2 \quad \beta = \frac{IR}{IR}$$



*FIG 17. Discriminación de cuerpos de agua y sombra utilizando Índices vegetales.*

La generación de la máscara se realizó, luego de la discriminación de nubes y sombras básicamente apoyado en la interpretación visual, ya que en esta técnica se puede incluir criterios espectrales y espaciales (Chuvieco, 2010). Para este caso en particular se puede decir que el 9.13% del área de estudio no se analizará.

## 4.2 Selección de zonas de entrenamiento.

Para la selección de sitios de entrenamiento se adaptó la clasificación del PROMAS (Programa para el Manejo del Agua y del Suelo – Universidad de Cuenca), con el propósito de identificar las coberturas para la clasificación de la imagen satelital de 1985 y posteriormente generar una base de comparación para validar la clasificación.

Teniendo en cuenta estos antecedentes se determinaron seis clases de coberturas: (1) Bosques/vegetación densa– para lo cual se generó una imagen en falso color utilizando las bandas 3-4-5, la misma ayudó a identificar las zonas de este tipo de cobertura, (2) Pasto /zonas de cultivo - esta clase se identificó por medio de NDVI, formula 4.1.1,

propuesto por Rouse *et al* (1974), este índice de vegetación utiliza la banda del infrarrojo cercano IRC y del rojo R, para determinar valores altos de reflectancia los mismos que representan o indican mayor vigor vegetal, (3) Centros Poblados -la combinación de las bandas 2-3-4, (4) Cuerpos de agua – para determinar esta clase se la discriminó por medio del índice de vegetación formula 4.1.2 , (5) Paramo – por medio de la combinación de las bandas 4-3-2 , (6) Suelo descubierto/zonas con escasa vegetación – utilizando las bandas 2-3-4. En la figura 18 se observa la forma y tonalidad de las clases de cobertura.

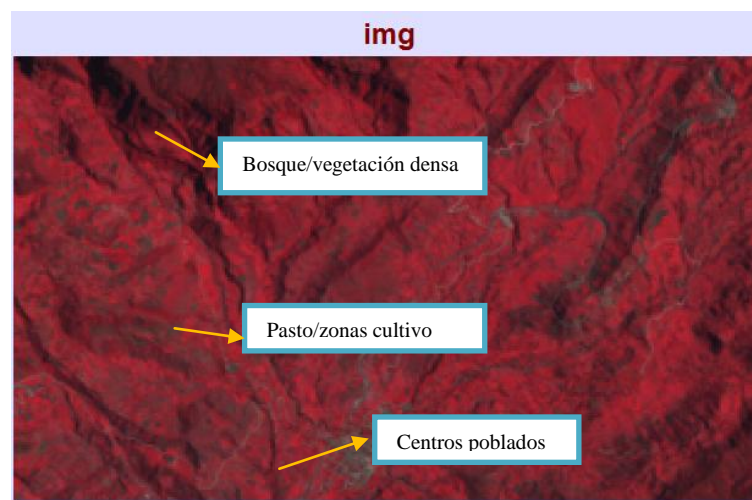
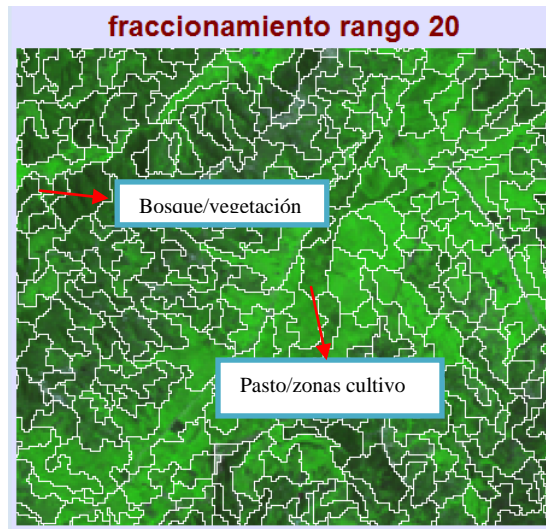


FIG 18. Selección de sitios de entrenamiento por segmentación, combinación 432

Se realizaron los fraccionamientos de las imágenes, en rangos de 10-20 y 30, dando como resultado final el fraccionamiento en rango 30 y 20 como se observa en la figura 19, esto atiende a la necesidad de generar agrupaciones con mayor número de coberturas sin generalizar los resultados. Este proceso se realiza teniendo en cuenta que el algoritmo toma como base los ND de los vecinos cercanos y agrupa, dejando fuera los píxeles que no poseen estos rangos de ND.



*FIG 19. Captura de pantalla Software IDRISI, Modulo Segmentation rango 20*

#### **4.3 Clasificador de máxima probabilidad.**

Este método considera que los ND se ajustan a una distribución normal, tomado una decisión acerca de la clase de superficie terrestre a la que pertenece cualquier pixel. (Chuvieco, 2010), (Eastman, 2012). Tomando en cuenta los valores medios, matriz de varianza-covarianza permite calcular la probabilidad de que un pixel corresponda a la categoría seleccionada, este método es el más utilizado en la clasificación híbrida en teledetección.

Con la ayuda del módulo Maxlike de IDRISI el cual emplea sitios de entrenamiento, se clasificó las distintas imágenes de los años de 1987 y 2001.



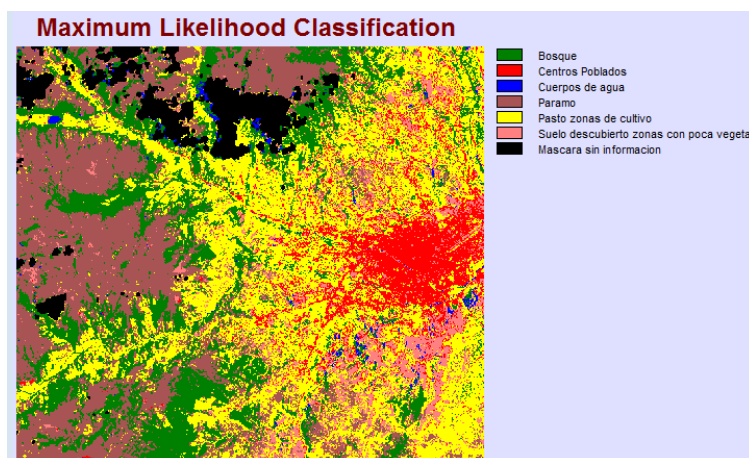


FIG 20 Captura de pantalla Clasificación final de la imagen 1987 - Clasificación rígida, módulo Maxlike IDRISI.

Con el propósito de homogenizar la información de la clasificación y presentar en una escala acorde a la resolución espacial de la imagen, se aplica a la imagen clasificada el módulo SEGGLAS el cual toma como referencia la clasificación basada en segmentos y la clasificación basada en pixeles. Este módulo agrupa los pixeles que se encuentran en cada segmento tomando en cuenta su ND y sus vecinos próximos. (figura 21).

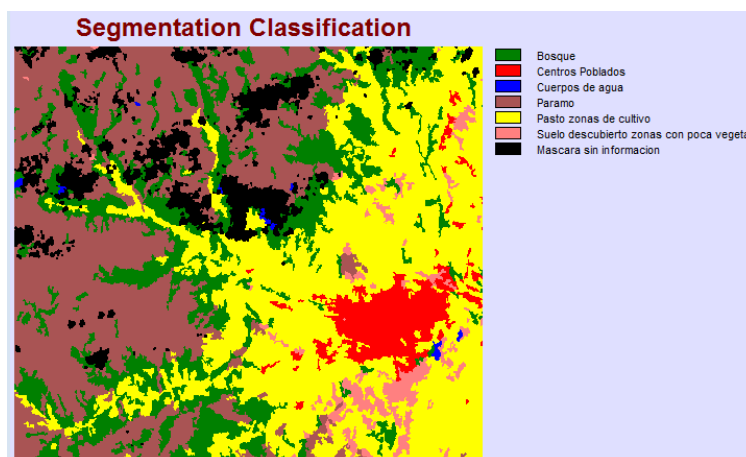


FIG 21. Captura de pantalla, Clasificación final de la imagen 1987 - Suavizado de la clasificación y homogenización con el Módulo Segclass Software IDRISI Selva

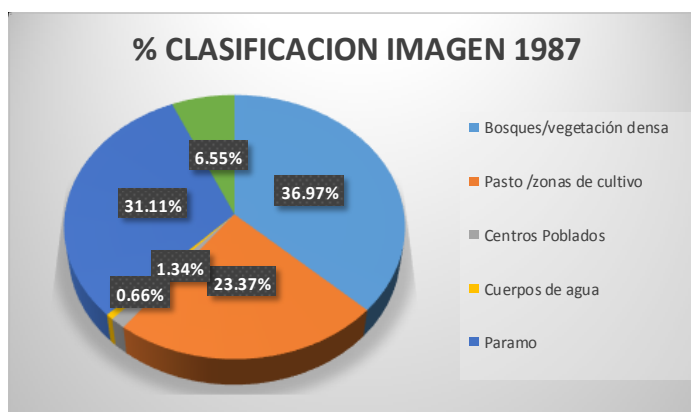


#### 4.4 Coberturas de suelo

De acuerdo al análisis estadístico descriptivo de la tabla 11 y figura 22 de la imagen clasificada de 1987, se observa la categoría bosque/vegetación densa con una extensión de 209555.28ha aproximadamente, que representa el 36.97% siendo esta el área más representativa de la zona, seguida de la cobertura paramo con un total de 176386.77ha representa el 31.11%, cobertura de pasto/zonas de cultivo con 132470.64ha representa 23.37%, para suelos con escasa vegetación/descubiertos un total de 37127.88ha representa el 6.55%, seguido de centros poblados 1.34% y cuerpos de agua 0.66%.

*TABLA 11. Coberturas de suelo de la CRP hectáreas y porcentajes (1987)*

Coberturas	HA	%
Bosques/vegetación densa	209555.28	36.97%
Pasto /zonas de cultivo	132470.64	23.37%
Centros Poblados	7596.9	1.34%
Cuerpos de agua	3751.65	0.66%
Paramo	176386.77	31.11%
Suelo descubierto/zonas con escasa vegetacion	37127.88	6.55%



*FIG 22. Estadística de la cobertura de suelos en la clasificación de 1987.*

Analizando la clasificación de 2001 grafico 22, se determina que la cobertura de bosque /vegetación densa tiene una extensión aproximada de 176701.14ha que representa el 30.62%, páramo con una extensión de 147855.78ha representando el 25.26%, pastos / zonas de cultivo con una área de 159885.63ha con el 27.70%, seguido de suelos con escasa vegetación / descubiertos con 78706.43ha que estima el 13.81%, por último las cubiertas de centros poblados y cuerpos de agua 1.64% - 0.61% respectivamente.

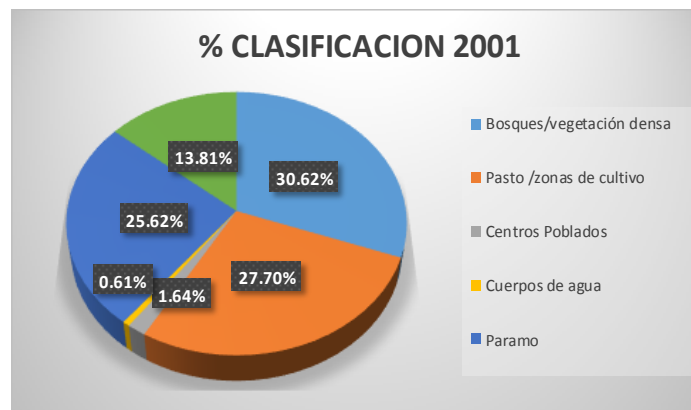


FIG 23. Estadística de la cobertura de suelos en la clasificación de 2001.

#### 4.5 Validación de la clasificación.

Para la validación de la clasificación de las imágenes correspondientes a los años de 1987 y 2001 se generó la matriz de confusión, con puntos de muestreo obtenidos con la interpretación visual de las imágenes y verificadas en las clasificaciones obtenidas.

Se seleccionaron un promedio de 4901 píxeles en las coberturas de la clasificación de 1987, siendo lo mínimo del umbral requerido según Congalton, (1991); Hay, (1979) de 50 píxeles por cada cobertura o clase temática. Al culminar con la selección de coberturas de muestreo se obtuvieron un total de 24551 píxeles de verificación de la clasificación 1987, promedio de 5166 y un total de 30999 para la clasificación 2001.

Acontinuacion se presenta en la tabla 12 el numero de muestras adquiridas de las distintas imgenes segmentads, teniendo presente los valores minimos de pixel requeridos.

**TABLA 12.** *Numero muestras de sitios de entrenamiento (segmentos) para la clasificacion.*

Coberturas	# segmentos
Bosques/vegetación densa	24
Pasto /zonas de cultivo	8
Centros Poblados	7
Cuerpos de agua	10
Paramo	8
Suelo descubierto/zonas con escasa vegetacion	19

#### 4.6 Matriz de confusión de las clasificaciones

Con la ayuda del módulo Cross Tab de IDRISI, se obtuvo la matriz de confusión para posteriormente realizar los análisis respectivos como se muestran en las tablas 13-14 respectivamente.

**TABLA 13.** *Matriz de confusión para la clasificación de 1987*

Clasificación	1	2	3	4	5	6	total	Exactitud usuario	Error de comisión
1	5834	0	0	215	0	0	6049	96.45%	3.55%
2	61	1827	0	0	0	112	2000	91.35%	8.65%
3	0	0	1897	0	0	38	1935	98.04%	1.96%
4	256	0	0	3847	0	266	4369	88.05%	11.95%
5	225	6	0	0	4470	0	4701	95.09%	4.91%
6	17	0	0	0	30	1761	1808	97.40%	2.60%
total	6393	1833	1897	4062	4500	2177		20862	
Exactitud usuario	91.26%	99.67%	100.00%	94.71%	99.33%	80.89%			19636
Error de omisión	8.74%	0.33%	0.00%	5.29%	0.67%	19.11%			

Los números hacen referencia a las categorías 1=Bosques/vegetación densa, 2=Pasto /zonas de cultivo ,3=Centros Poblados, 4=Cuerpos de agua, 5=Paramo, 6=Suelo descubierto/zonas con escasa vegetación. Fiabilidad Global de 0.94 y un Indice kappa global de 0.93

**TABLA 14. Matriz de confusión para la clasificación de 2001**

Clasificación	Referencia						total	Exactitud usuario	Error de comisión
	1	2	3	4	5	6			
1	7795	463	0	211	9	0	8478	91.94%	8.06%
2	461	4867	68	0	408	207	6011	80.97%	19.03%
3	0	0	2917	0	0	452	3369	86.58%	13.42%
4	73	0	0	2220	28	65	2386	93.04%	6.96%
5	237	0	0	1	6793	0	7031	96.61%	3.39%
6	1	0	242	0	12	1756	2011	87.32%	12.68%
total	8567	5330	3227	2432	7250	2480		29286	
Exactitud usuario	90.99%	91.31%	90.39%	91.28%	93.70%	70.81%			26348
Error de omisión	9.01%	8.69%	9.61%	8.72%	6.30%	29.19%			

Los números hacen referencia a las categorías 1=Bosques/vegetación densa, 2=Pasto /zonas de cultivo ,3=Centros Poblados, 4=Cuerpos de agua, 5=Paramo, 6=Suelo descubierto/zonas con escasa vegetación. Fiabilidad Global de 0.90 y un Índice kappa global de 0.87

Para la imagen clasificada con fecha 1987 tabla 13 y 2001 tabla 14, se obtuvo un kappa global de 0.87 y 0.93 una fiabilidad de 0.94 y 0.90 respectivamente. Estos parámetros fueron calculados en hoja electrónica con los criterios ecuaciones citadas en el marco teórico.

Los análisis anteriores sobre las matrices de confusión fueron interpretadas de acuerdo a los valores de la tabla de concordancia tabla 15, para validación de clasificaciones según Landis y Koch, (1977), citado por Cerda & Villarroel, (2008).

**TABLA 15. Valoración para el Coeficiente kappa**

Coeficiente kappa	Fuerza de la concordancia
0,00	Pobre (Poor)
0,01-0,20	Leve (Slight)
0,21-0,40	Aceptable (Fair)
0,41-0,60	Moderada (Moderate)
0,61-0,80	Considerable (Substantial)
0,81-1,00	Casi perfecta (Almost perfect)

Los datos obtenidos en este estudio se determinan como aceptables, teniendo en cuenta las exactitudes para esta escala de trabajo superan el 80% en su mayoría y el nivel de concordancia es casi perfecta, según la comparación en la tabla 15.

#### 4.7 Ganancia y pérdida de coberturas vegetales

Realizada la clasificación híbrida con las seis categorías antes mencionadas que se sintetizan en el anexo 2, se analizó los cambios de forma general que ha sufrido esta Cuenca hidrográfica en el transcurso de 14 años (1987 – 2001).

En la figura 24 se muestra en porcentaje, el ganancia y pérdida de las distintas coberturas vegetales de la cuenca del Río Paute, estos resultados se obtuvieron con la ayuda del módulo LCM de IDRISI el cual determina de una manera rápida los cambios sufridos en las coberturas, obteniendo resultados de pérdidas o ganancias, netos en las transiciones especificadas (Eastman, 2012).

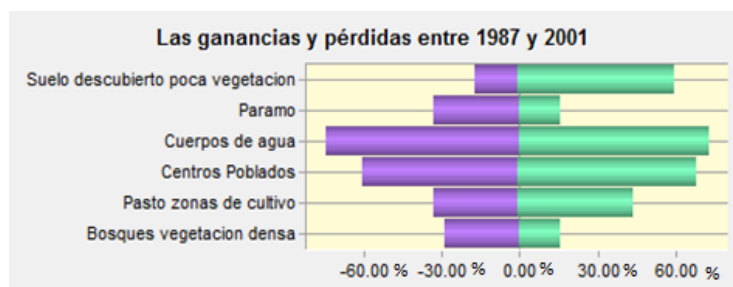


FIG 24. Ganancias y pérdidas en porcentaje de la cobertura vegetal de la CRP. Utilizando LCM de IDRISI para los años 1987 – 2001.

En cuanto a los porcentajes de ganancia que se muestran en la figura 24 los cambios son más visibles para la cobertura de suelo descubierto/zonas con escasa vegetación, con un aumento del 42.89% en 14 años, esto también ocurre con la cobertura de pasto /zonas de cultivo teniendo un aumento del 11.26% en el mismo lapso de tiempo.

Lo contrario pasa con las coberturas de páramo que disminuye (pérdida) un 18.27% en relación al año de 1987, con un 13.21% la cobertura de bosques/vegetación densa disminuye en el transcurso de 1987 al 2001.



#### 4.8 Modelo de crecimiento de coberturas y validación.

Para el desarrollo de este estudio se consideró las imágenes de 1987 y 2001 para la construcción de un modelo de cambio de cobertura y su validación será realizada con la cobertura conocida del 2010.

En esta predicción del cambio de cobertura de suelo se utilizó un modelo basado en las *cadenas de Markov* donde la distribución espacial de la cobertura de suelos tiene como referencia el tiempo  $t$ , el mismo que es el resultado de un tiempo anterior  $t-1$  ya que se encuentra íntimamente relacionado al evento anterior.

Para la realización del análisis espacial de predicción es necesario disponer de dos tiempos de comparación, para este estudio se propuso como tiempo el año de 1987 y como en año 2001, estos dos tiempos son relacionados y analizados por el programa para posteriormente construir una imagen de probabilidad de transición y una matriz de probabilidad de cambio ( $p$ ). Esta información obtenida sirvió para el cálculo del estado de un pixel a un estado futuro los mismos que se calculan a través de los AC y Markov, para este caso el tiempo de predicción fueron de 14 años.

Teniendo en cuenta el estado de un sistema y las proporciones de cada categoría para un tiempo determinado se tiene la fórmula 4.8.1:

$$4.8.1 \quad [x_1, x_2, x_3, \dots, x_n]$$

donde para obtener el estado del sistema para el tiempo  $(t+1)$  se logra multiplicando el vector por la matriz de probabilidad de cambio fórmula 4.8.2:

#### 4.8.2. $x_t P$

Se tiene que realizar la misma operación para los demás estados o tiempos de predicción

$$4.8.3 \quad x_{t+1} P = x_t P^2$$

$$x_{t+1} = x_{t+2} P = x_{t+1} P^2 = x_t P^3$$

En la tabla 16 se muestra la matriz de probabilidad obtenida para el cambio de cobertura del año 1987 a 2010.

*TABLA 16. Matriz de probabilidad de cambio 1987 al 2010*

		2010(%)					
		1	2	3	4	5	6
1987 (%)	1	0.673	0.230	0.000	0.011	0.086	0.000
	2	0.059	0.643	0.055	0.006	0.021	0.216
	3	0.001	0.020	0.432	0.004	0.000	0.543
	4	0.091	0.091	0.006	0.300	0.234	0.277
	5	0.130	0.166	0.000	0.000	0.648	0.056
	6	0.000	0.124	0.026	0.005	0.100	0.745
		Los números hacen referencia a las categorías 1=Bosques/vegetación densa, 2=Pasto /zonas de cultivo, 3=Centros Poblados, 4=Cuerpos de agua, 5=Paramo, 6=Suelo descubierto/zonas con escasa vegetación.					

Teniendo en cuenta que; los cambios temporales probabilísticos no tienen conexión espacial, se toma la imagen de probabilidad de transición y con el módulo de autómatas celulares (CA\_Markov, IDRISI) se ubican espacialmente los pixeles con mayor probabilidad de cambio.

A partir de las imágenes de 1987 y 2001 se realizó la predicción para el 2010, la imagen obtenida fue comparada con la imagen real del 2010, la misma que posee una concordancia espacial aceptable como se observa en la figura 25.

Para este análisis se realizó una matriz de confusión de las capas temáticas de las imágenes del 2010 (imagen obtenida e imagen real), obteniendo el valor de fiabilidad de 0.93 y el índice kappa de 0.91, que comparado con los valores de la tabla de concordancia del índice kappa representan una estimación *casi perfecta*.

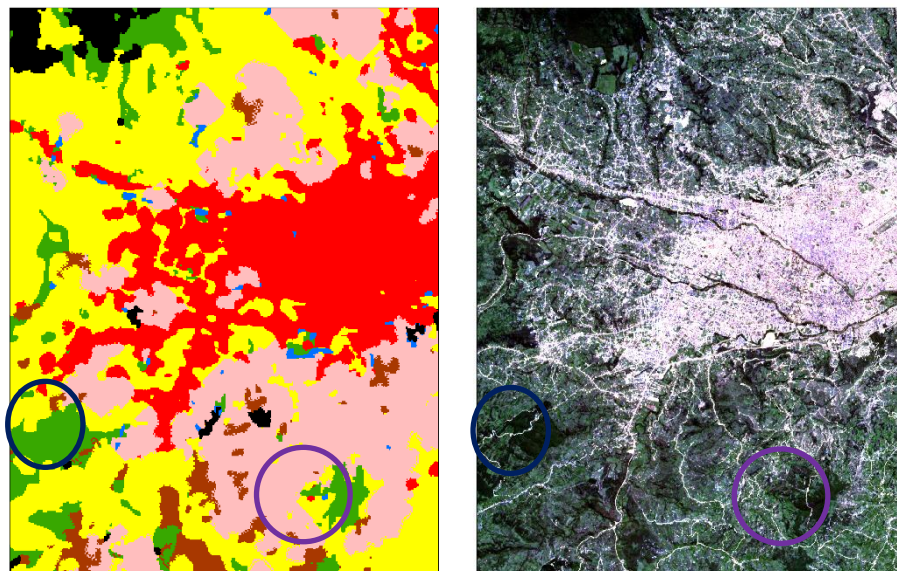


FIG 25. Comparación de Coberturas entre clasificación proyectada y realidad (1987 izquierda, 2010 derechas real)

A continuación se muestra la matriz de confusión tabla 17, para la imagen real de 2010 y la proyectada para la misma fecha.

TABLA 17. Cruce tabular entre la clasificación real de 2010 y la proyectada CA Markov 2010, nivel de concordancia.





Referencia clasificacion 2010 real										
Clasificacion prediccion CA Markov 2010		1	2	3	4	5	6	total	Exactitud usuario	Error de comisi3n
	1	1894	24	0	0	23	19	1960	96.63%	3.37%
	2	447	707	0	4	12	36	1206	58.62%	41.38%
	3	0	0	4104	0	0	1	4105	99.98%	0.02%
	4	0	0	0	515	0	103	618	83.33%	16.67%
	5	5	30	0	0	2448	5	2488	98.39%	1.61%
	6	12	0	0	0	0	284	296	95.95%	4.05%
	total	2358	761	4104	519	2483	448			
Exactitud usuario										
		80.32%	92.90%	100.00%	99.23%	98.59%	63.39%			

Los n3meros hacen referencia a las categor3as 1=Bosques/vegetaci3n densa, 2=Pasto /zonas de cultivo ,3=Centros Poblados, 4=Cuerpos de agua, 5=Paramo, 6=Suelo descubierto/zonas con escasa vegetaci3n. Fiabilidad Global de 0.93 y un Indice kappa global de 0.91

En la tabla 17 se observa el nivel de concordancia entre la imagen proyectada y la real para las coberturas de la cuenca del R3o Paute, con el 100% centros Poblados excelente concordancia, cuerpos de agua con el 99.23%, seguido de la cobertura de P3ramo con el 98.59%, la Pasto /zonas de cultivo 92.90%, Bosques/vegetaci3n densa y Suelo descubierto/zonas con escasa vegetaci3n con el 80.32% y 63.39% respectivamente.

Teniendo en cuenta el coeficiente kappa para esta validaci3n  $K = 0.91$ ; se puede determinar que, desde el punto de vista alfanum3rico la validaci3n presenta una muy buena concordancia de la imagen proyectada con la situaci3n real del a3o 2010.

Comparando la cobertura de Bosques/vegetaci3n densa para el a3o estimado y el a3o real se determina que sobrepasa en un 4% del 3rea real, esto implica que los aut3matas celulares conjuntamente con las cadenas de Markov dan mejores resultados y presentan una excelente alternativa en la estimaci3n del cambio de suelos que sufrir3a cierta zona con un rango de error aceptable.

#### 4.9 Predicción del cambio de cobertura de suelo para el año 2015 y 2025

Tomando en cuenta la matriz de probabilidad de cambio para los años de 1987, 2015 y 2025(anexo 3) se realizó la predicción de los cambios de cobertura para la cuenca del Río Paute.

*TABLA 18. Matriz de probabilidad de cambio para el periodo 1987 a 2015 en porcentajes.*

		2015(%)					
		1	2	3	4	5	6
1987 (%)	1	0.603	0.265	0.002	0.010	0.100	0.020
	2	0.068	0.569	0.055	0.006	0.033	0.270
	3	0.002	0.041	0.333	0.005	0.012	0.608
	5	0.106	0.123	0.009	0.215	0.242	0.306
	6	0.151	0.198	0.000	0.001	0.570	0.080
	6	0.008	0.144	0.028	0.005	0.112	0.703
Los números hacen referencia a las categorías 1=Bosques/vegetación densa, 2=Pasto /zonas de cultivo ,3=Centros Poblados, 4=Cuerpos de agua, 5=Paramo, 6=Suelo descubierto/zonas con escasa vegetación.							

Para el modelo de simulación de cambio de cobertura de suelo se emplearon técnicas basadas en cadenas de Markov, Autómatas Celulares y evaluaciones multicriterio y objetivo, las mismas que están integradas en el software que se empleó IDRISI.

Para la predicción del cambio de cobertura se emplearon dos imágenes que fueron clasificadas y tratadas para su modelación que va desde 2001 a 2015.



Como se puede observar en la tabla 19, durante el período de predicción 2001-2015 (14 años); el área de estudio posee grandes cambios en la cobertura vegetal, siendo la principal la cobertura de Suelo descubierto/zonas con escasa vegetación con un 64.01% de cambio de cobertura, lo que implica una ganancia del 71.01% para esta cobertura, se estima también que la cobertura de pasto/zonas de cultivo un cambio del 12.71% con una ganancia de 61.64%; también se verificó que los cambios para la cobertura de Cuerpos de agua se estimó en un 1.84%, al verificar los valores de cambio de cobertura se tiene que la cobertura de Bosque /vegetación densa tendrá un cambio de 29.18%, 13.67% en la cobertura de Centros poblados, 31.18% para la cobertura de Páramo.

*TABLA 19. Porcentajes de cambios de cobertura de suelo periodo 2001 – 2015.*

Unidades de cobertura	Perdida	Ganancia	Cambio
<b>Bosques/vegetación densa</b>	41.56	12.38	29.18
<b>Pasto /zonas de cultivo</b>	48.93	61.64	-12.71
<b>Centros Poblados</b>	70.57	84.24	-13.67
<b>Cuerpos de agua</b>	83.22	85.06	-1.84
<b>Paramo</b>	45.15	13.97	31.18
<b>Suelo descubierto/zonas con escasa vegetación</b>	7.00	71.01	-64.01

En las figuras 26, 27 y 28 se observa espacialmente los cambios sufridos y proyectados por las coberturas de la cuenca del Río Paute durante el lapso de 9-14-28 años respectivamente.



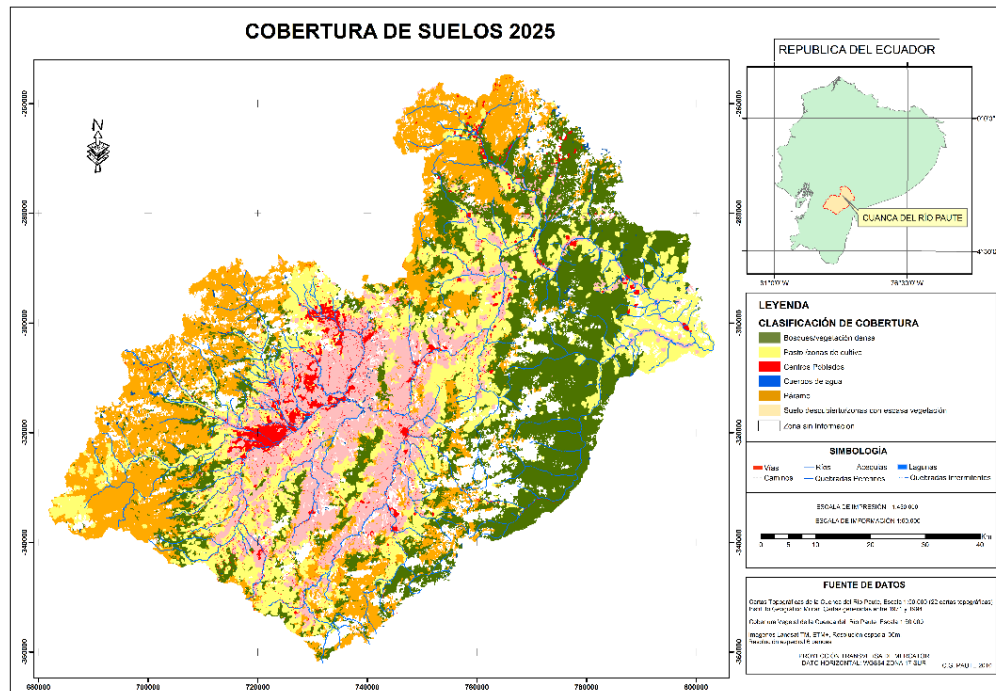


FIG 28. Mapa de cobertura de suelo para la Cuenca del Río Paute año 2025.

En el siguiente figura(29), se presenta la dinámica de cambio de la cobertura de suelo para la cuenca del Río Paute desde los años de 1987-2025.

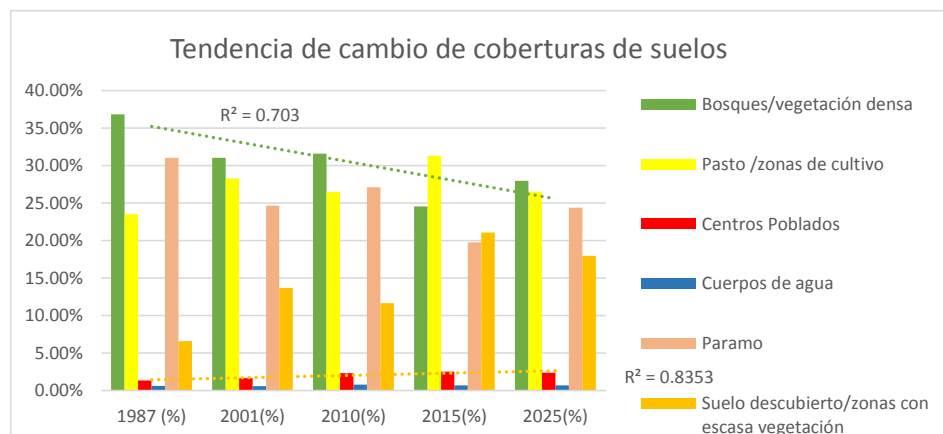


FIG 29. Dinámica de cambio de cobertura de suelos de 1987 a 2025.



Analizando los datos de las simulaciones efectuadas al 2025, se puede observar que la tendencia al cambio de la cobertura de Bosque /vegetación densa está relacionada con el paso del tiempo, ya que se obtiene un  $R^2 = 0.703$  con una tendencia lineal; esto también sucede con el crecimiento de la cobertura de centros poblados que se obtiene un  $R^2 = 0.835$  con una tendencia lineal hasta el año simulado.

#### 4.10 Análisis de Resultados.

- Al realizar los análisis para la determinación de coberturas vegetales para la cuenca del Río Paute estas se clasificaron en seis tipos de coberturas de suelo, desde el año 1987 hasta el 2010 donde luego del análisis multitemporal y utilización de técnicas geoinformáticas se obtuvo como promedio la siguiente clasificación, siendo la más representativa la de bosques/vegetación densa en un 33,17%, en segundo lugar paramo en 27,61%, la tercera pastos/zonas de cultivo en 26,11%, la cuarta suelo descubierto/zonas con escasa vegetación en un 10,66%, la quinta los centros poblados 1,78% y la sexta los cuerpos de agua en 0,68%.
- Con el análisis realizado en la cuenca del Río Paute mediante este trabajo en el periodo 1987 – 2015, se demuestra que el 57,19% de las coberturas de suelo se mantuvieron. Y que el 42,81% que son 24823,44 ha aproximadamente han cambiado el tipo de cobertura de suelo, el cambio más notorio es en la cobertura bosque/vegetación densa que a inicios del estudio en 1987 ocupaba el 36,84%



del territorio de la CRP y que en 2010 tenía el 31,61%. Este cambio se relaciona con el crecimiento de la frontera agrícola que existe en el territorio y se demuestra en el incremento de la cobertura de pasto/zonas de cultivo que del 23,54% en 1987 pasa a 26,48% en el 2010, como se muestra en el mapa de cambio de cobertura de suelo ver Anexo 7.

- Del total de 24823,44ha que sufrieron cambios en su cobertura, el 35.75% corresponde a la cobertura de bosque/vegetación densa, el 32.73% a la cobertura de paramo, el 26.91% corresponde a la cobertura de pasto/zonas de cultivo, 2.23% a centros poblados, 1.23% y 1.15% a cuerpos de agua y suelo descubierto/poca vegetación respectivamente.
- Teniendo en cuenta que la cobertura de bosque/vegetación densa es la más notoria, se puede determinar que dicha cobertura sufrió un cambio de un 26.05% a pasto/zonas de cultivo, la cobertura de pasto/zonas de cultivo a suelo descubierto/escasa vegetación en un 21.33%, la cobertura de páramo a pasto/zonas de cultivo en un 18.55%, al contrario, la cobertura de centros poblados que tiene una ganancia del 4.96% (ver anexo 5).
- Lo que se refiere a la predicción del cambio de cobertura de suelo de esta cuenca hidrográfica se estima que la cobertura de bosque/vegetación densa disminuirá de 31.61% a 27.99% (2010 - 2025), por otro lado la cobertura de pastos/zonas de cultivo tendrá un aumento en el año de 2015 del 31.34% y una disminución en el 2025 a un 26.52%. Otra cobertura de interés que se debe analizar es la de centros poblados que pasará de un 2.31% a 2.41% poseyendo un tendencia lineal de crecimiento, lo mismo sucede con la cobertura de suelo descubierto/zonas con escasa vegetación que pasará de un 11.67% a 17.99% para los años estimados (anexo 6).



UNIVERSIDAD DE CUENCA





## **CAPÍTULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

### **5 Conclusiones y Recomendaciones.**

La predicción sobre el cambio de coberturas vegetales es muy importante para la conservación de la vegetación y de vida silvestre, es por eso que se debe profundizar la investigación en estos temas en las Universidades del país.

Al culminar con este estudio se puede concluir que las metodologías y análisis empleados en este trabajo, son de alta confiabilidad para obtener una predicción cercana a la realidad referente a las coberturas vegetales de la cuenca del Río Paute.

#### **Identificación de las coberturas vegetales en la Cuenca del Río Paute.**

Se identificaron las distintas coberturas de suelos, tomando como referencia las imágenes obtenidas desde el sensor Landsat con seis bandas espectrales y empleando los índices de vegetación, estas coberturas fueron verificadas con sitios de entrenamiento.

#### **Clasificación de las coberturas vegetales de la Cuenca del Río Paute**

La clasificación de las coberturas vegetales se realizó con un método híbrido, que combina dos metodologías, una basada en píxeles y otra basada en segmentos, que es el ideal para trabajar con la escala 1:50000 empleada en este estudio.

#### **Predicción de los cambios de las coberturas vegetales de la Cuenca del Río Paute**

Se realizó la predicción de las coberturas vegetales con las Cadenas de Markov, las cuales utilizan métodos estocásticos con variables discretas que toman como fuente principal de información el estado anterior al actual, generando una matriz de predicción



la cual es empleada por los autómatas celulares para materializar los cambios de coberturas.

Se validó el modelo de predicción utilizando los índices de fiabilidad y kappa (valor superior al 80%) los cuales resultan de la comparación de la clasificación predicha y la clasificación real de la imagen del 2010.

*Los resultados de esta investigación pueden servir para su aplicación en los distintos Planes de Desarrollo y Ordenamiento Territorial de los distintos niveles de Gobiernos inmersos en el área de estudio (CRP).*

## **5.2 Recomendaciones.**

Se puede recomendar la aplicación de la metodología utilizada en la presente investigación para la predicción de los cambios de la cobertura vegetal ya que da resultados confiables al dar una predicción cercana a la realidad.

### **Identificación de las coberturas vegetales en la Cuenca Del Rio Paute.**

Se recomienda tener en cuenta otras coberturas vegetales de suelo dependiendo de la escala en la cual se trabaja. Se pueden identificar más coberturas vegetales si se trabaja con imágenes satelitales Rapideye que tienen una resolución espacial de cinco metros.

### **Clasificación de las coberturas vegetales de la Cuenca del Rio Paute**

Se recomienda utilizar el método híbrido cuando se trabaja con escalas mayores a 1:50000, existen otros métodos de clasificación de imágenes satelitales los cuales son más efectivos para escalas inferiores a 1:50000.



### **Predicción de los cambios de las coberturas vegetales de la Cuenca del Río Paute**

Al utilizar las Cadenas de Markovse puede llegar a predecir de una manera rápida ya que toman en cuenta el estado anterior del actual y no permite explorar otras variables que condicionan los cambios de usos del suelo, es por eso que para la presente investigación se combinó con autómatas Celulares.

Se recomienda utilizar regresiones logísticas o análisis multicriterio para generar mapas de aptitud que se utilicen como base para el Autómata Celular y así comprarlos y difundir sus resultados.

En lo referente al análisis de predicción de cambio de cobertura es recomendable no establecer épocas muy distantes para mayor fiabilidad de resultados.



## CAPÍTULO VI: BIBLIOGRAFIA Y ANEXOS.

### 6 Bibliografía

- Alejandro Velazquez, E. D. (s.f.). *Situación actual y prospectiva del cambio de la cubierta vegetal y uso en Mexico*. Mexico.
- Bart, C. (2010). comparación de índices de vegetación a partir de imágenes modis en la región del libertador bernardo o'higgins, chile, en el período 2001-2005. *Tecnologías de la Información Geográfica*, Pag.10.
- Becerra, G. A., & Castillo, J. N. (2009). Servicio Grid para la clasificación no supervisada de imágenes satelitales utilizando autómatas celulares. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, pp. 59-76.
- Briceño, F. (2003). Cambios de cobertura de la tierra en el valle del río Momboy, Estado Trujillo. *Geoenseñanza Vol. 8*, 91-100.
- Castilla, G. (2003). *Object-Oriented analysis of remote sensing images for land cover mapping: conceptual foundations and a segmentation method to derive a baseline partition for classification*. Madrid.
- Cerda, J., & Villarroel, L. (2008). Evaluación de la concordancia inter-observador en investigación pediátrica: Coeficiente de Kappa. *Chil Pediatr*, pp. 54-58.
- CG Paute, C. d. (2010). Atlas de la Cuenca del Paute. Cuenca, Azuay, Ecuador.
- Chuvieco, E. (2002). *Teledetección Ambiental*. Barcelona: Ariel Ciencia.
- Chuvieco, E. (2010). *Teledetección Ambiental*. España: Ariel Planeta S.A.
- Congalton RG, G. K. (1999). *Assessing the accuracy of remotely sensed data: Principles and practices*.
- Cuesta, A. (2005). Metodología operativa para la obtención del coeficiente de cultivo desde imágenes de satélite. *ITEA*, pp 212-224.



Eastman, J. R. (2012). *IDRISI Selva Guía para SIG y Procesamiento de Imágenes*.

Elena G. Irwin a, J. G. (2001). Theory, data, methods: developing spatially explicit economic models of land use change. *ELSEVIER*, 17.

Espinoza, G. R. (2009). Identificación del cilindro nudoso en imágenes tc de trozas podadas de pinus radiata utilizando el clasificador de maxima verosimilitud. *Ciencia y tecnología*, 117-127.

Gutiérrez, A. (2005). Clasificación no supervisada de coberturas vegetales sobre imágenes digitales de sensores remotos: "landsat – etm+". *Rev.Fac.Nal.Agr.Medellín*. Vol.58, 2611-2634.

Gutiérrez, M. A., Bedoya, J. W., & Fernández, V. B. (2005). Clasificación no Supervisada de Coberturas Vegetales sobre Imágenes Digitales de Sensores Remotos: "Landsat - Etm+". *Revista Facultad Nacional de Agronomía de Medellin*, pp. 2611-2634.

Harald, M. (1997). *Fundamentos del procesamiento digital de imágenes*. Mexico.

Hernandez, G., & Torres, L. G. (1994). Automatas celulares estocásticos. *Lecturas Matemáticas*, pp. 167–191.

Lopez, A. f. (2007). Clasificacion de coberturas en imagenes satelitales multiespectrales mediante automatas celulares con concepto de agricultura de precision. *I2+D*, pp. 2 - 6 .

Martin Paegelow, M. T. (2003). Cadenas de Markov, evaluación multicriterio y evaluación multiobjetivo para la modelización prospectiva del paisaje. *Revista Internacional de Ciencia y Tecnologia de la Informacion geografica*, 22-44.

Maryland, U. o. (1997). *Global Land Cover Facility*. Obtenido de GLCF: <http://glcfapp.glcf.umd.edu/>

Morales-Luna, G. (2002). *Introduccion a la logica difusa*.

Navarro, A. (2011). *Introduccion a los Sistemas de Informacionn Geografica y Geotelematica*. Barcelona: UOC.

Noel Bonfilio Pineda Jaimes\*, J. B. (2009). Análisis de cambio del uso del suelo en el Estado de México mediante sistemas de información geográfica y técnicas de



- regresión multivariantes. Una aproximación a los procesos de deforestación. pp. 20.
- Novo, E. (2002). Sensoriamento Remoto. En *Princípios e Aplicações*. São Paulo: Edgard Blucher. 2da edição.
- P. Almeida, M. D. (2009). Aplicación de técnicas SIG, Sensoramiento Remoto y Análisis Multicriterio para la Detección de Impactos Antropogénicos en la Cobertura de Suelos y su Proyección para el 2010. Caso de estudio: Estuario de Santos (Brasil). *Revista Tecnológica ESPOL*, 7.
- Padilla, O. (2005). Autómatas Celulares: Una solución a la Geosimulación. *Revista Geoespacial 2*, Pag. 86.
- Palash, & Sarkar. (1999). A Brief History of Cellular Automata. *ACM Computing Surveys*, pp. 82- 107.
- Paruelo, J. (2008). La caracterización funcional de ecosistemas mediante sensores remotos. *Ecosistemas*, 4-22.
- Perea, A. J., Merocho, J. E., & Aguiara, M. J. (2009). Clasificación orientada a objetos en fotografías aéreas digitales para la discriminación de usos del suelo. *Interciencia*, pp. 612-616.
- Rada, D., & Manuel, J. (2007). Cambios de cobertura y uso del suelo (1979-2000) en dos comunidades rurales en el noroeste de Quintana Roo. *Investigaciones Geográficas*, 104-124.
- Ramirez, J. P. (2002). Clasificación y predicción de Cambios de Cobertura del Suelo en la Comuna de Ninhue (secano interior), Provincia de Ñuble, VIII Region. . *Revista Geografica Norte Grande*, 11.
- Rao, L. K. (1998). Development of a GIS base application for selection of villages for sodic land reclamation. .
- Rodriguez, A. (2011). *Metodología para detectar cambios en el uso de la tierra utilizando los principios de la clasificación orientada a objetos, estudio de caso piedemonte de Villavicencio, Meta*. Bogota.
- Santos, J. C. (2007). *Extração de atributos de forma e seleção de atributos usando algoritmos genéticos para classificação de regiões*. São José dos Campos.



- Trimble. (2012). *www.trimble.com*. Recuperado el 03 de 8 de 2012, de *www.trimble.com*: [http://trl.trimble.com/docushare/dsweb/Get/Document-441257/JunoSeries\\_UserGuide\\_v1\\_RevD\\_ESP.pdf](http://trl.trimble.com/docushare/dsweb/Get/Document-441257/JunoSeries_UserGuide_v1_RevD_ESP.pdf)
- Trujillo, I. H. (2009). *Simulación de sistemas naturales autómatas celulares*. Instituto Politécnico Nacional Centro de Investigación en Computación, Mexico.
- UDA. (2008). *SIG (CRP)*. Cuenca.
- University, C. (s.f.). Obtenido de <http://www.clarklabs.org>
- Vargas, E. G., Neira, N. O., & Arango, D. F. (2013). Métodos de segmentación de nubes en imágenes satelitales. *Tecnura*, pp. 96-110.
- Vega, J. M., & Isabel, M. P. (2010). Guía Didáctica de Teledetección y Medio Ambiente. *Red Nacional de Teledetección Ambiental*, 67p.
- Vega, M. V. (24 de abril de 2004). Cadenas de Markov de tiempo continuo y aplicaciones.
- Victor Saldoval, P. R. (2005). Modelamiento y prognosis estadística y cartográfica del cambio en el uso de la tierra. *BOSQUE*, 9.
- Weng, Q. (2009). *Remote Sensing and GIS Integration: Theories, Methods, and Applications*. New York: McGraw-Hil.



## 7 Anexos.

### ANEXO 1

#### Análisis estadístico imagen landsat 1987

1987					
		Minima	Maxima	Madia	Desv. Estandar
	Banda 1	38	256	58.252	8.53
	Banda 2	12	161	26.775	6.081
	Banda 3	8	200	23.724	7.987
	Banda 4	5	213	64.212	20.55
	Banda 5	6	256	69.197	24.67
	Banda 7	2	256	26.988	11.443

#### Análisis estadístico imagen landsat 2001

2001					
		Minima	Maxima	Madia	Desv. Estandar
	Banda 1	42	256	66.119	11.744
	Banda 2	25	256	56.75	14.391
	Banda 3	18	256	56.128	21.717
	Banda 4	10	256	73.941	19.542
	Banda 5	5	256	97.601	1.965
	Banda 7	1	256	59.083	25.351





## ANEXO 2

<b>Coberturas 1987</b>	<b>HA</b>	<b>%</b>
Bosques/vegetación densa	209555.28	36.97%
Pasto /zonas de cultivo	132470.64	23.37%
Centros Poblados	7596.9	1.34%
Cuerpos de agua	3751.65	0.66%
Paramo	176386.77	31.11%
Suelo descubierto/zonas con escasa vegetacion	37127.88	6.55%

<b>Coberturas 2001</b>	<b>HA</b>	<b>%</b>
Bosques/vegetación densa	176701.14	30.62%
Pasto /zonas de cultivo	159885.63	27.70%
Centros Poblados	9450.45	1.64%
Cuerpos de agua	3533.76	0.61%
Paramo	147855.78	25.62%
Suelo descubierto/zonas con escasa vegetacion	79706.43	13.81%

<b>Coberturas 2010</b>	<b>HA</b>	<b>%</b>
Bosques/vegetación densa	192334.32	0.3604302
Pasto /zonas de cultivo	136693.53	0.2561606
Centros Poblados	13850.73	0.025956
Cuerpos de agua	4397.76	0.0082413
Paramo	135143.1	0.2532551
Suelo descubierto/zonas con escasa vegetacion	51204.87	0.0959568



### ANEXO 3

#### Matriz de probabilidad de cambio 1987 a 2010

		2010(%)					
		1	2	3	4	5	6
1987 (%)	1	0.673	0.230	0.000	0.011	0.086	0.000
	2	0.059	0.643	0.055	0.006	0.021	0.216
	3	0.001	0.020	0.432	0.004	0.000	0.543
	4	0.091	0.091	0.006	0.300	0.234	0.277
	5	0.130	0.166	0.000	0.000	0.648	0.056
	6	0.000	0.124	0.026	0.005	0.100	0.745
Los números hacen referencia a las categorías 1=Bosques/vegetación densa, 2=Pasto /zonas de cultivo ,3=Centros Poblados, 4=Cuerpos de agua, 5=Paramo, 6=Suelo descubierto/zonas con escasa vegetación.							

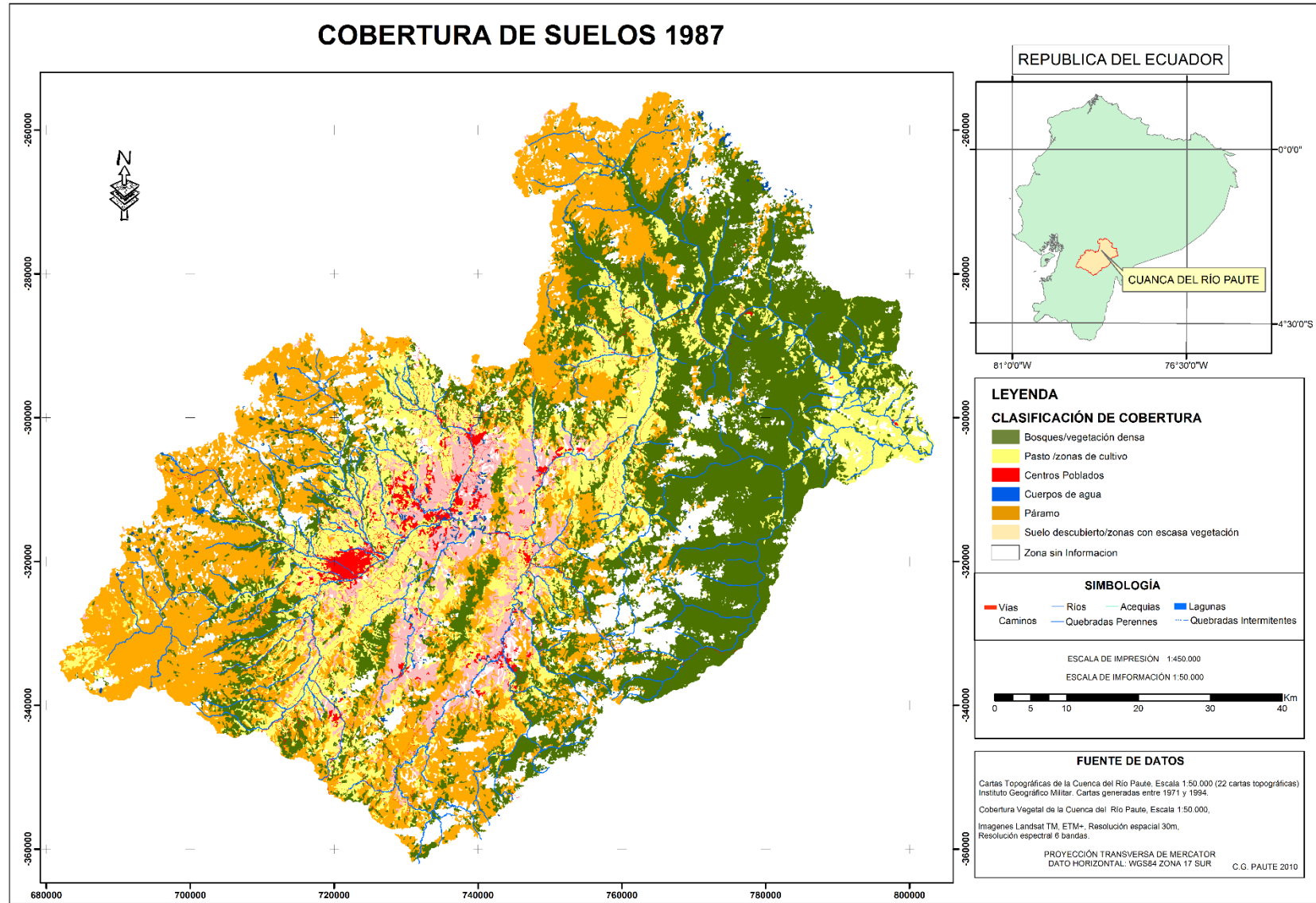
#### Matriz de probabilidad de cambio 1987 a 2015

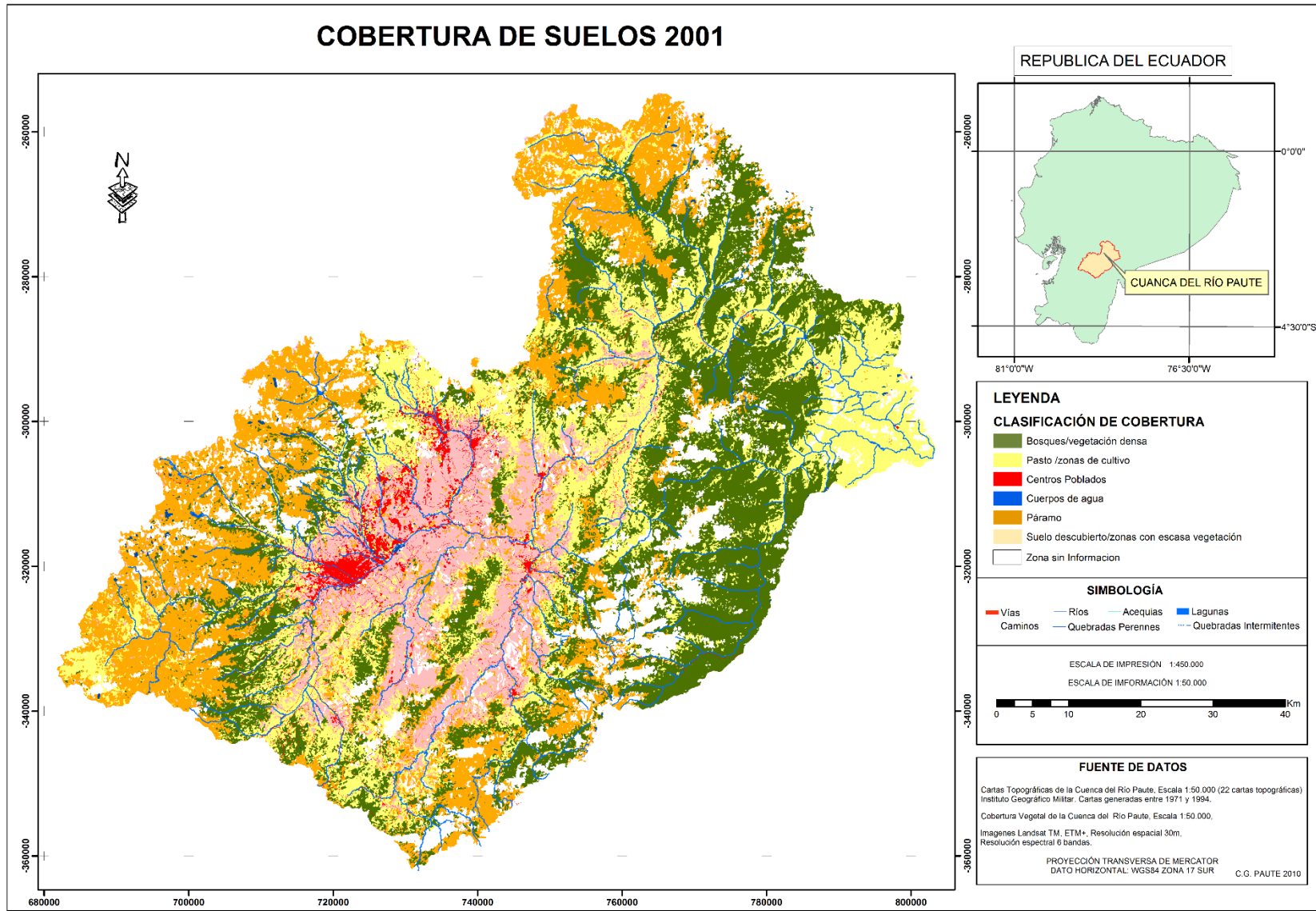
		2015(%)					
		1	2	3	4	5	6
1987 (%)	1	0.603	0.265	0.002	0.010	0.100	0.020
	2	0.068	0.569	0.055	0.006	0.033	0.270
	3	0.002	0.041	0.333	0.005	0.012	0.608
	5	0.106	0.123	0.009	0.215	0.242	0.306
	6	0.151	0.198	0.000	0.001	0.570	0.080
	6	0.008	0.144	0.028	0.005	0.112	0.703
Los números hacen referencia a las categorías 1=Bosques/vegetación densa, 2=Pasto /zonas de cultivo ,3=Centros Poblados, 4=Cuerpos de agua, 5=Paramo, 6=Suelo descubierto/zonas con escasa vegetación.							

#### Matriz de probabilidad de cambio de 1987 a 2025

		2025(%)					
		1	2	3	4	5	6
1987 (%)	1	0.481	0.319	0.009	0.010	0.122	0.059
	2	0.083	0.443	0.057	0.006	0.052	0.360
	3	0.006	0.077	0.168	0.005	0.039	0.705
	5	0.129	0.175	0.014	0.073	0.253	0.357
	6	0.185	0.250	0.006	0.003	0.434	0.123
	6	0.021	0.179	0.031	0.005	0.134	0.630
Los números hacen referencia a las categorías 1=Bosques/vegetación densa, 2=Pasto /zonas de cultivo ,3=Centros Poblados, 4=Cuerpos de agua, 5=Paramo, 6=Suelo descubierto/zonas con escasa vegetación.							

## ANEXO 4





## ANEXO 5

COBERTURAS DE CAMBIO	HA	PORCENTAJE
Bosques vegetación densa to Centros Poblados	1491.84	0.62%
Bosques vegetación densa to Cuerpos de agua	2652.48	1.10%
Bosques vegetación densa to Paramo	11554.02	4.80%
Bosques vegetación densa to Pasto zonas de cultivo	62722.89	26.05%
Bosques vegetación densa to Suelo descubierto poca vegetación	7684.83	3.19%
<b>perdida</b>	<b>86106.06</b>	<b>35.75%</b>
Centros Poblados to Bosques vegetación densa	9.36	0.00%
Centros Poblados to Cuerpos de agua	17.82	0.01%
Centros Poblados to Paramo	39.06	0.02%
Centros Poblados to Pasto zonas de cultivo	35.37	0.01%
Centros Poblados to Suelo descubierto poca vegetación	5258.61	2.18%
<b>perdida</b>	<b>5360.22</b>	<b>2.23%</b>
Cuerpos de agua to Bosques vegetación densa	310.77	0.13%
Cuerpos de agua to Centros Poblados	27	0.01%
Cuerpos de agua to Paramo	935.28	0.39%
Cuerpos de agua to Pasto zonas de cultivo	342.99	0.14%
Cuerpos de agua to Suelo descubierto poca vegetación	1355.13	0.56%
<b>perdida</b>	<b>2971.17</b>	<b>1.23%</b>
Paramo to Bosques vegetación densa	14874.48	6.18%
Paramo to Centros Poblados	632.88	0.26%
Paramo to Cuerpos de agua	149.4	0.06%
Paramo to Pasto zonas de cultivo	44675.91	18.55%
Paramo to Suelo descubierto poca vegetación	18489.87	7.68%
<b>perdida</b>	<b>78822.54</b>	<b>32.73%</b>
Pasto zonas de cultivo to Bosques vegetación densa	1859.85	0.77%
Pasto zonas de cultivo to Centros Poblados	9558.54	3.97%
Pasto zonas de cultivo to Cuerpos de agua	555.48	0.23%
Pasto zonas de cultivo to Paramo	1467.45	0.61%
Pasto zonas de cultivo to Suelo descubierto poca vegetación	51362.46	21.33%
<b>perdida</b>	<b>64803.78</b>	<b>26.91%</b>
Suelo descubierto poca vegetación to Bosques vegetación densa	57.51	0.02%
Suelo descubierto poca vegetación to Centros Poblados	236.34	0.10%
Suelo descubierto poca vegetación to Cuerpos de agua	35.82	0.01%
Suelo descubierto poca vegetación to Paramo	1548	0.64%
Suelo descubierto poca vegetación to Pasto zonas de cultivo	882	0.37%
<b>perdida</b>	<b>2759.67</b>	<b>1.15%</b>
<b>área cambio</b>	<b>240823.44</b>	<b>42.81%</b>
<b>área no cambio</b>	<b>321676.83</b>	<b>57.19%</b>
<b>área total</b>	<b>562500.27</b>	

## ANEXO 6

## Cambio y estimación de cobertura de suelos de 1987 a 2015 en porcentaje.

	1987 (%)	2001(%)	2010(%)	2015(%)	2025(%)
<b>Bosques/vegetación densa</b>	36.84%	31.06%	31.61%	24.57%	27.99%
<b>Pasto /zonas de cultivo</b>	23.54%	28.30%	26.48%	31.34%	26.52%
<b>Centros Poblados</b>	1.35%	1.67%	2.31%	2.52%	2.41%
<b>Cuerpos de agua</b>	0.63%	0.59%	0.80%	0.71%	0.71%
<b>Paramo</b>	31.04%	24.67%	27.12%	19.78%	24.38%
<b>Suelo descubierto/zonas con escasa vegetación</b>	6.60%	13.70%	11.67%	21.07%	17.99%





## ANEXO 7

### MAPAS DE CAMBIO DE COBERTURA DE SUELOS

